*

METATEMAS

Libros para pensar la ciencia
Colección dirigida por Jorge Wagensberg

Al cuidado del equipo científico del Museu de la Ciència
de la Fundació "la Caixa"

* Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor

Jorge Wagensberg

LA REBELIÓN DE LAS FORMAS

O cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta

TUSQUETS
EDITORES

1.ª edición: octubre 2004
2.ª edición: enero 2005

© Jorge Wagensberg, 2004

Esta obra ha sido publicada con la ayuda de la Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas del Ministerio de Cultura

Pinturas de Dalí incluidas en las páginas 179, 181, 273 y 275: © Salvador Dalí, Fundació Gala-Salvador Dalí, VEGAP, 2004

Diseño de la cubierta: Lluís Clotet y Ramón Úbeda
Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. - Cesare Cantù, 8 - 08023 Barcelona
www.tusquets-editores.es
ISBN: 84-8310-975-1
Depósito legal: B. 1.079-2005
Fotocomposición: David Pablo
Impreso sobre papel Goxua de Papelera del Leizarán, S.A. - Guipúzcoa
Impresión: Limpergraf, S.L. - Mogoda 29-31 - 08210 Barberà del Vallès
Encuadernación: Reinbook
Impreso en España

Índice

P. 15 Prólogo. Un buen lugar para pensar

Primera parte. Cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta

19 1. Objetos y fenómenos
en el gran catálogo de la realidad

26 2. El derecho de la naturaleza a una dosis de azar
y la constitución de una realidad con más restricciones que obligaciones

41 3. Individualidades e individuos
en la nervura de lo real

60 4. Selección fundamental, selección natural, selección cultural
o la cuestión de empezar a existir y la de seguir existiendo

82 5. Hacia Darwin de la mano de Spinoza
ante la mirada crítica de Kant

93 6. Comprender la realidad
con la ayuda de lo que bien podríamos llamar función

107 7. La ley general del cambio
pese a la insistencia de lo real en seguir siéndolo

123 8. La emergencia de las formas en la naturaleza
a partir de la ocurrencia de un niño de cinco años

136 9. Nueve respuestas (o más) para un par (o menos) de preguntas
una intuición a favor de una teoría general de la forma

155 Epílogo de la primera parte. Inacabando...

Segunda parte. La rebelión de las formas
161 10. La esfera protege...
183 11. El hexágono pavimenta...
195 12. La espiral empaqueta...
207 13. La hélice agarra...
219 14. El ángulo penetra...
230 15. La onda comunica...
239 16. La parábola emite y recibe...
243 17. La catenaria aguanta...
249 18. Los fractales colonizan...
275 Epílogo de la segunda parte. Lo bello y lo inteligible

Apéndices
311 Referencias
317 Índice onomástico

A todos los que trabajan, en algo,
para un museo de ciencia...

AGRADECIMIENTOS

Hernán Crespo, Ambrosio García Leal, Simone Mateos y Marta Solsona son cuatro personas muy diferentes, pero las cuatro aceptan el papel de *sparring* intelectual y las cuatro inician su respuesta con un «sí, pero...».

Sin acabar, una obra permanece viva, peligrosa.
Una obra acabada es una obra muerta, asesinada.

Pablo Picasso

Prólogo
Un buen lugar para pensar

Un museo es un buen lugar para pensar. Diré por qué: en un museo la prioridad está en los objetos y en los fenómenos. Todo empieza con la selección de piezas. El museólogo se pasea por el mundo de una manera especial. Barre el suelo con la mirada, acaricia todo lo que se pone a su alcance, pregunta aun conociendo la respuesta... Su secreto, nunca del todo confesado, es éste: ¡no sabe lo que busca hasta que lo encuentra! Luego llegan las ideas. Los conceptos son bienvenidos procedan de donde procedan, de la ciencia, del arte, de las creencias, de la propia museología... Pensar un museo se parece mucho al proceso de construir un edificio, pero al revés. Primero son las piezas (el tejado, los acabados), luego es la coherencia, el discurso (la estructura central), y finalmente es la filosofía, los objetivos (los cimientos). Un museo es un buen lugar para pensar porque en él coinciden objetos e ideas que de otro modo difícilmente llegan a acercarse entre sí. Eso hace crecer la probabilidad de colisión. Las hay de tres clases: objeto con objeto (en una buena colección, los objetos no se ignoran entre sí), idea con objeto e idea con idea. Cada reacción es una oportunidad para la emergencia de un nuevo objeto o de una nueva idea. Un museo es realidad concentrada. Un museo es un reactor de ideas. Por eso es un buen lugar para pensar. Y a veces, por encima de cierta concentración crítica, incluso es posible que arranque una reacción en cadena. Es lo que en una ocasión sucedió en el Museu de la Ciència de la Fundació "la Caixa" en Barcelona, con motivo de la exposición titulada *¡Y después fue la forma...!*

Este volumen trata de ordenar las ideas antes de que se las lleve el viento. Consta de dos partes. Primero fue la segunda, una reflexión sobre la emergencia de las formas en la naturaleza. Luego fue la primera, una reflexión sobre el comportamiento de la realidad entera. En la pri-

mera parte se introducen las palabras que, en principio, no lograba encontrar para escribir la segunda.

¿A quién puede interesar recorrer estas páginas? Yo diría que a cualquier lector que no se encoja de hombros ante una pregunta como ésta: ¿qué tienen en común objetos tan dispares como el Sol, un planeta, una naranja, una pelota, un huevo de caviar o una burbuja en una copa de cava?

Me apresuro a admitir que este ensayo es un ejercicio inacabado en dos tiempos inacabados. En cualquier momento, uno puede tropezar con un objeto que cambie la verdad vigente, o que sugiera un toque de cincel. La ciencia nunca se cierra definitivamente. En la ciencia, como en la realidad misma, todo está siempre inacabándose... El gran D'Arcy Thomson se pasó la vida rescribiendo el mismo libro [1].* ¡Qué bien comprendo esto ahora!

Camburí (Brasil), 25 de diciembre de 2003

* El lector encontrará el texto de estas referencias entre corchetes en el Apéndice final de este libro. *(N. del E.)*

Primera parte
Cómo perseverar cuando la incertidumbre aprieta

1
Objetos y fenómenos
en el gran catálogo de la realidad

La realidad se compone de dos cosas: objetos y fenómenos. Los objetos ocupan el espacio, los fenómenos ocupan el tiempo. Los objetos son distribuciones espaciales de materia, energía e información. Los fenómenos son cambios temporales de los objetos. La creación de la realidad coincide con la creación del tiempo. En el instante siguiente se inicia la transformación de la realidad, la expansión del espacio y el despliegue del tiempo.

Según las teorías cosmológicas, al poco de nacer el tiempo, la cantidad de materia del universo se estabilizó en unos dos billones y medio de trillones de cuatrillones de kilos. Desde entonces la materia no ha dejado de pasar de un objeto a otro. Lo mismo ocurre con la energía y la información. Los objetos cambian. Cambian de materia. Cambian de energía. Cambian de información. Los objetos cambian de identidad. Todo lo que empieza, acaba o se transforma.

Hubo un tiempo en el que la realidad era una especie de sopa de quarks más o menos homogénea. Pero basta un vistazo a nuestro alrededor para convencernos de que las cosas se han complicado. Hay objetos en los que predomina la materia, como una gota de agua o un puñado de arena. Hay objetos en los que predomina la energía, como un rayo de sol o el entorno de un imán. Y hay objetos en los que predomina la información, como un pedazo de ADN o un poema.

¿Cómo es posible que el mero transcurso del tiempo cambie las cosas? Lo que más tenemos es tiempo. Y el tiempo siempre acaba pasando. Es sólo cuestión de tiempo. Una galaxia, un árbol o una catedral son ejemplos de objetos que aparecen, se transforman y desaparecen, de manera que pasan a engrosar lo que bien podríamos llamar el gran catálogo de los objetos del mundo, la enorme lista de los objetos que, en algún momento, han accedido a la realidad. En rigor y en el límite, un objeto es sólo idéntico a sí mismo.

La identidad de un objeto se define por el conjunto de propiedades que lo distinguen de cualquier otro objeto del gran catálogo. Todo objeto induce una particular partición del mundo: él mismo y el resto del mundo. Por ello, dado un objeto cualquiera, se puede hablar de tres conceptos que le son propios: su interior, su exterior y la frontera que separa lo uno de lo otro. No importa cuán compacta, continua, conexa o nítida sea la frontera. Propiedades típicamente interiores son, por ejemplo, la *estructura* o la *composición*... Propiedades más bien exteriores son la *inteligibilidad*, la *frecuencia* de su presencia, la *diversidad* o la *función*... Propiedades típicas de la frontera son la *forma* o el *tamaño*.

Toda buena propiedad depende de una buena definición y de una buena manera de medir. Algunas, muy subjetivas, dependen mucho de la calidad de un eventual sensorio y de un cerebro capaces de recibir e interpretar la información que emana del objeto. Es el caso del color, el sabor, el sonido, el tacto... Otras propiedades son muy objetivas, como la ubicación espacial respecto de una referencia preasignada. (Obsérvese que para afirmar que no hay dos objetos idénticos basta considerar la posición espacial como una de las propiedades del objeto y apelar luego al principio de impenetrabilidad de la materia.)

En este ensayo nos proponemos comprender una de estas propiedades, la *forma*. Sin embargo, reconocemos como trascendentes todas aquellas propiedades que contribuyen con algún mérito a distinguir un objeto de otro. Sobrevolamos ahora el significado de algunas de ellas.

La *estructura* de un objeto tiene que ver con una partición (relevante) de la globalidad del objeto en partes (que son asimismo relevantes). Cada partición particular define un Todo como el resultado de una colección de Partes en interacción. La interacción es, de hecho, lo que impide que un Todo sea la suma simple de sus Partes. Aún no nos hemos puesto de acuerdo sobre lo que significa *comprender* la realidad, pero adelantemos aquí que la estructura es una propiedad de gran ayuda para comprender muchos casos. La estructura de un objeto puede conservar detalles de su propia historia. Al cortar una montaña por un plano vertical nítido, por ejemplo, es posible descubrir una estructura de estratos, sedimentos antiguos en el fondo de un lago o de un mar. Los estratos pueden ser muy variados: horizontales, inclinados, plegados o quebrados. Los geólogos pueden reconstruir con ello la his-

toria de la formación del objeto montaña. Digamos que una sopa de bacterias independientes, otro ejemplo, tiene menos estructura que un agregado de células fuertemente unidas por lazos físicos, y éste a su vez, menos estructura que un tejido de células con una actividad física y química bien trabada y coordinada. Digamos que no existen organismos vivos sin una partición interna relevante. La vida no es una especie de película continua derramada sobre el planeta. No existen entes vivos sin estructura, o, dicho de otro modo, para estar vivo se necesita una mínima partición interna. Una maqueta de la torre Eiffel construida con cerillas, todas iguales, tiene menos estructura que un reloj de mesa y éste menos estructura que una calculadora científica de bolsillo, y ésta menos estructura que una simple lombriz de tierra. Algo nos hace intuir que la estructura puede medirse, algo nos dice que la estructura es una propiedad interesante de los objetos...

La *composición* de un objeto se refiere a la distribución de materia según sean las familias de átomos y moléculas involucrados. Las partes y sus respectivas interacciones tienen un soporte material y ponen en juego unos transportes físicos y unas transformaciones químicas muy relevantes. Las varvas de Itú (Brasil) son rocas formadas hace 260 millones de años en el fondo de un lago glacial. En aquella época el clima global del planeta era más frío (en Brasil, que se encontraba mucho más al sur, había glaciares). Cada varva corresponde a un año y está formada por dos capas. Una es oscura debido al lento sedimento de finos limos cargados de materia orgánica producido en el invierno, cuando la superficie del lago está helada; la otra es clara debido al aporte de tierras y arenas que se produce durante la primavera y el verano.

No hay individuos vivos homogéneos o de composición química arbitraria. Muy al contrario, en la materia viva ciertos átomos y moléculas son mucho más frecuentes que otros. La gran diferencia entre, digamos, un pez y la mejor de sus reproducciones en resina es sin duda su composición. La composición química de una piedra, otro ejemplo, puede contener información suficiente para concluir que su origen no es terrestre sino un fragmento de un meteorito formado bastante antes que el propio sistema solar. La composición del tronco de una palmera puede dar pistas sobre su elasticidad, la que permite a esta planta doblarse ante la fuerza de un huracán y no verse arrancada de cuajo como

tantos otros árboles. La composición es una propiedad que aporta comprensión.

El *tamaño* de un objeto se refiere a su espacio interior, al pedazo de espacio encerrado por la frontera que separa su interior de su exterior. En algunos casos esta magnitud está nítidamente definida sobre un volumen compacto, como ocurre con un canto rodado fluvial. En otros, como en el de un átomo, un banco de peces o un poema, se requieren acuerdos complementarios. El tamaño puede ser también una propiedad relevante para comprender un objeto. La estructura de una roca sedimentaria, por ejemplo, se compone de objetos de distinto tamaño. Son piedras más pequeñas o granos de arena depositados quizá por sedimentación. Pues bien, un corte en la dirección vertical del campo gravitatorio revela que los granos están ordenados de menor a mayor tamaño. La razón está en que la velocidad límite de sedimentación de un cuerpo pequeño en un líquido viscoso como el agua es menor que la de un cuerpo grande. La caída clasifica los granos por tamaños. Los animales grandes retienen el calor más que los pequeños, porque su relación superficie/volumen es más pequeña. La relación entre calor disipado y tamaño del individuo no es, como cabría esperar, una proporción de la masa elevada a la potencia 2/3 sino a la potencia 3/4. Analizaremos este complicado misterio a la hora de hablar de una forma muy relacionada con el crecimiento en el mundo vivo y en el mundo inerte, los fractales. Todo objeto del gran catálogo del mundo sólo es posible dentro de un rango de tamaños. No existen estrellas del tamaño de un huevo de gallina ni un solo huevo del tamaño de una estrella. Siempre existe un límite superior y uno inferior.

La *forma* de un objeto es una propiedad de la superficie frontera que separa su interior de su exterior. La forma es una profunda propiedad superficial de un objeto. También es una propiedad que puede ayudar a su comprensión. Cuanto más rueda un canto rodado, más tiende su forma a la simetría esférica. No existen planetas cúbicos o troncocónicos. Atendiendo a la forma de un pez o de un pájaro puede adelantarse algo sobre sus desplazamientos más frecuentes (grandes travesías o patrullas locales). Basta observar la forma de una herramienta o una pieza dental para predecir si sirve para cortar, pinchar, percutir o moler... La forma aporta inteligibilidad para comprender un objeto. He aquí una pista a favor de esta afirmación: muchos objetos,

nada sospechosos de estar relacionados entre sí, exhiben la misma forma.

Las propiedades del objeto que se refieren al resto del mundo, es decir, a su exterior, es decir, a la realidad particular en la que está inmerso, tienen que ver con eso que hemos llamado *comprender*, esto es, comprender los objetos, comprender el conjunto de sus propiedades. Son la *frecuencia*, la *diversidad*, la *función*... Todas esas propiedades son útiles para construir la inteligibilidad de los objetos porque todas versan sobre lo común y lo diverso.

Lo acabamos de apuntar y lo repetimos ahora de otra manera: si la identidad de dos objetos coincide exactamente, entonces es que se trata del mismo objeto. Una vez admitido este detalle límite podemos atender a aquello que comparten dos objetos distintos o, por extensión, a la intersección de los objetos de una colección. Esa esencia compartida define una nueva entidad que bien podemos llamar *clase*. Un objeto es inteligible respecto de una colección de objetos, de la que es miembro; si existe una clasificación (o colección de clases) tal que cada uno de tales objetos pertenece a una y sólo una de sus clases. Las clases pueden ser inteligibles a su vez respecto de otras clases y con ello aumenta la inteligibilidad del objeto. Cuanta mayor sea la esencia compartida entre dos objetos o dos clases de objetos, más próximos serán los objetos o las clases entre sí. Una estrella puede ser inteligible por su tamaño y por la clase de luz que emite. Un conejo es un objeto inteligible dentro de su madriguera como miembro de una especie, la suya, de una familia de roedores, como mamífero, tetrápodo, vertebrado, cordado y como miembro de pleno derecho del reino animal. Es la clasificación de Linneo. Un elemento químico se hace inteligible en la tabla de Mendeleiev. El diagnóstico médico hace inteligible una enfermedad, de modo que se espera que dos miembros de la misma clase se curen con el mismo tratamiento. Etcétera. Clasificar es una manera de reducir, de comprimir. La clasificación es una forma de comprensión. Tendremos que ahondar en este significado de la palabra «comprender», porque en él nos vamos a basar para tratar de comprender la forma de los objetos reales.

Una clasificación introduce, a su vez, otras dos propiedades interesantes que relacionan un objeto con su entorno: la *frecuencia* de su presencia y la *diversidad*. La frecuencia es, sencillamente, el número

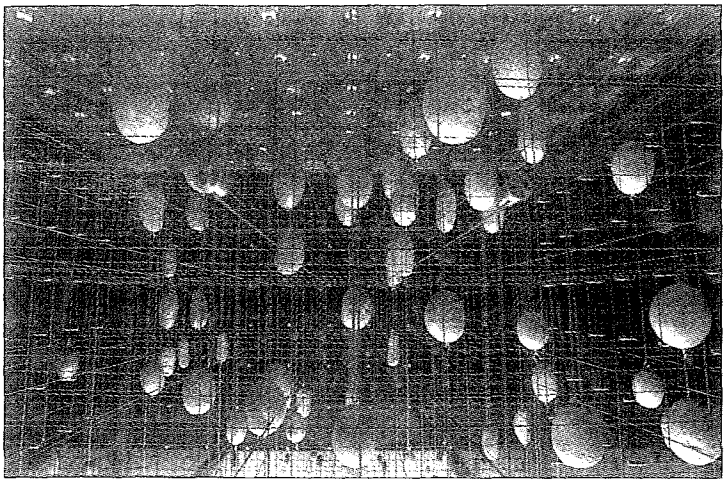


Figura 1.1. Cantos rodados ordenados según tres criterios: tamaño, de grande a pequeño (de arriba abajo); forma, de esférica a ovoide (de delante hacia atrás) y color, de oscuro a claro (de derecha a izquierda). Colección Museu de la Ciència de la Fundació "La Caixa" (MCFLC) fotografía de Sergio Parra.

de individuos de una clase. En un paisaje, una mariposa puede ser rara, en otro paisaje la misma mariposa puede ser frecuente. La diversidad es una propiedad que combina el número de clases diferentes y la frecuencia de su ocupación por los objetos en cuestión. La diversidad máxima corresponde al máximo de clases igualmente distribuidas, es el caso improbable de la equiprobabilidad (inviable espontáneamente en la naturaleza). Es, sin embargo, el caso frecuente de muchos objetos artificiales como un museo, un zoo o el arca de Noé. La diversidad mínima (asimismo inviable de forma espontánea en la naturaleza) corresponde a todos los individuos de una misma clase (una granja de pollos o un campo de trigo). La contribución de un objeto a la diversidad de un paisaje ayuda, sin duda, a la comprensión.

En el museo ha quedado (en principio) como permanente la exposición sobre la forma que (en principio) se concibió como temporal. Uno de sus elementos emblemáticos es, sencillamente, una clasificación de cantos rodados (figura 1.1) según tres criterios: el tamaño de la

pieza (de grande a pequeño), su forma (de esférica a cada vez más ovoide) y su composición (ordenada por ejemplo por el color, de claro a oscuro). Ordenados en tres dimensiones según un volumen cúbico definido por tres ejes con diez valores cada uno, se obtiene una escultura de rara belleza en la que caben hasta mil piedras. Es la belleza de la inteligibilidad científica.

Cualquier esquema conceptual empieza con la elección y la definición de los conceptos idóneos. La ciencia se esfuerza por definir los conceptos que juzga como relevantes para comprender el mundo. ¿Qué conceptos nos pueden ayudar a comprender la forma de los objetos reales? Adelantemos un plan de reflexión. Lo que existe, existe porque ha superado alguna clase de selección. Superar una selección equivale a superar una prueba de compatibilidad con el resto de la realidad. Equivale a ganar una baza de permanencia. Llamaremos «función» a esa ganancia. La función será el concepto estrella a la hora de comprender la emergencia y la perseverancia de las formas en la naturaleza. No se trata de la idea de función del lenguaje común, ni siquiera se trata de la idea de función que usan la matemática, la biología o la psicología. Es un concepto más amplio. Es un concepto que surge de pensar la realidad. A ello nos dedicamos en los siguientes cinco capítulos.

2
El derecho de la naturaleza a una dosis de azar y la constitución de una realidad con más restricciones que obligaciones

Sea el conjunto de todas las leyes fundamentales de la naturaleza, las conozcamos o no. Necesitamos dar nombre a esta idea. Llámese Constitución de la realidad. Es un homenaje a la Carta Magna del sistema jurídico de muchos países, un conjunto de leyes fundamentales. Son fundamentales porque actúan como restricciones de las demás leyes que se legislan en el Parlamento y que regulan la vida cotidiana de los ciudadanos. Además, la palabra constitución, referida a la realidad, evoca la estructura de la propia realidad. Nombrar es empezar a imaginar. ¿Cómo imaginar un conjunto llamado Constitución de la realidad?

Empecemos por imaginar un mundo sin ley. ¿Cómo sería la realidad si no existiera ni una sola ley de la naturaleza? Si la Constitución de la realidad fuese un conjunto vacío, todo lo lógicamente viable (sin contradicciones internas) sería igualmente verosímil. Todos los objetos del mundo serían igualmente frecuentes y todos los sucesos igualmente probables. Un objeto cualquiera podría sufrir un cambio cualquiera. Pero basta un vistazo a nuestro alrededor para constatar que el mundo no es así. El mundo no es una sopa amorfa, equiprobable, homogénea y uniforme donde todo vale.

Existen objetos y fenómenos imaginables, pero imposibles. Por ejemplo, un sol cúbico. Por ejemplo, un planeta que invierta espontáneamente el sentido de su rotación. Esto significa que la Constitución de la realidad no es un conjunto vacío de leyes. Y no sólo eso. El ejemplo nos invita a imaginar, además, en qué consiste una ley. Una ley es, como mínimo, una restricción. He aquí un indicio para intuir el carácter de una *ley de la naturaleza*.

La idea tiene su atractivo. Si el mundo que nos rodea se nos antoja diverso, creativo y cambiante es porque hay restricciones, porque *no todo vale* para acceder a la realidad y porque no todo vale para perma-

necer en ella. Tratemos de avanzar entonces con la idea de que la Constitución de la realidad tiene una estructura asimilable a una colección de restricciones. Cuanto más fuerte es el poder restrictivo de una determinada restricción, menor es el dominio de alternativas disponibles para la ocurrencia de un objeto o de un suceso. Es un dominio de incertidumbre, el margen de contingencia intrínseca a la que tiene derecho la naturaleza, la dosis de Azar con mayúscula, el territorio sin ley. Este dominio tiene dos límites.

Por un lado está la imposibilidad. Si hay demasiadas restricciones, es posible que un objeto se quede sin el resquicio mínimo necesario para su existencia. Una Constitución de la realidad demasiado restrictiva dejaría a la presunta realidad sin habitantes. Pero la realidad existe. Es la primera gran hipótesis de trabajo en ciencia: la hipótesis del mundo real. Cerca de este extremo nos encontramos con otro caso: el comportamiento único. La solución existe, pero es única. Las restricciones son tan fuertes que permiten poco. Tan poco que lo poco es único. Hay margen para una sola cosa. No hay margen para elegir ni para seleccionar. Las leyes y principios que se traducen como una determinación perfecta son (sobre todo han sido) de enorme prestigio en física. De las infinitas trayectorias posibles, sólo una ocurre en la realidad. Durante mucho tiempo ésta ha sido la situación soñada: leyes deterministas capaces de predecir, con la precisión que se desee, cualquier evolución del mundo. En este caso la restricción se viste de obligación. El artillero que se esmera en asegurar bien unas condiciones iniciales (cantidad de pólvora para fijar el valor de la velocidad inicial y ángulo del eje del cañón con la vertical para fijar su dirección) puede confiar en la segunda ley de Newton para «obligar» al obús que recorra la trayectoria destinada a hacer blanco (basta que, en algún momento, ésta pase por el blanco). La restricción es tan fuerte que no deja más lugar a la incertidumbre que el derivado de la torpeza del observador o de la necesaria imperfección de los instrumentos de medida. No hay elección. No hay espacio para el azar. El azar no llega a influir en la evolución de las cosas. Las más prestigiosas disciplinas de la física encajan en esta visión del mundo: la mecánica newtoniana, el electromagnetismo, la óptica geométrica, la termodinámica, la relatividad especial, la relatividad general. Incluso la física cuántica, si nos atenemos al hecho de que su ecuación fundamental, la de Schrödinger,

es una ecuación diferencial que maneja la función de onda (cuya interpretación es, eso sí, una probabilidad).

Todas estas teorías comparten algo que fascina a muchos físicos, entre los que, desde luego, me incluyo. Las ecuaciones de sus respectivas leyes fundamentales son todas distintas. Manejan distintas magnitudes y conceptos. La matemática de dichas leyes maneja funciones diversas y exhibe una estética distinta. Sin embargo, casi todas se pueden deducir de una misma clase de principios. Son los llamados principios variacionales [2] y [3]. Muchos científicos han soñado con una especie de principio ultrauniversal y fundamental de la naturaleza. En resumen, el principio se establece sobre una magnitud física, propia de la disciplina en cuestión (la acción en mecánica, el camino recorrido por la luz en óptica, etcétera), cuya integral, definida entre dos puntos, admite infinitas trayectorias posibles. Su versión más célebre es sin duda el principio de la mínima acción, del que se deduce elegantemente la mecánica analítica. Pues bien, la trayectoria que realmente ocurre, la que se da en la naturaleza, es la que minimiza (a veces maximiza) el valor de dicha integral. Los principios variacionales seleccionan una trayectoria de las infinitas posibles. Se trata de un caso límite del concepto de elección, la elección obligada. No sabemos si los principios variacionales son la expresión de algo muy profundo de la naturaleza o un curioso artefacto matemático que se oculta tras cualquier ecuación diferencial. Pero son como mínimo algo: la elegante manera de mostrar la elección que, en física fundamental, se esconde detrás de toda obligación. Una obligación puede interpretarse entonces como un caso límite de prohibición. Con ello nos atrevemos a acariciar una idea sobre el carácter general de una ley de la naturaleza:

Una ley de la naturaleza es más una prohibición que una obligación.

Algo muy similar ocurre con el concepto de ley en el código penal o en una normativa ética. Según esta visión del mundo, leyes que se presentan a nuestros ojos como obligaciones ineludibles no son más que la expresión de fuertes restricciones. La obligación es una ilusión de restricción. De aquí surge, creo, un germen de respuesta a una pregunta muy especial. Según cómo, se trata de la primera pregunta, según

cómo, se trata de la última. Es la que se plantea todo científico antes de empezar a tratar de comprender y la que se plantea después de creer que ha comprendido. Me la he planteado en muchas ocasiones y con ella he medido a colegas y amigos [4]. Hasta ahora, lo confieso, me he escabullido a la hora de sugerir una respuesta. Ésta es la pregunta:

¿Es el azar un producto de nuestra ignorancia o un derecho intrínseco de la naturaleza?

Dicho de otra manera: ¿es todo ley? O aun: ¿todo lo que ocurre en la realidad, ocurre obedeciendo cierta ley, conocida o no, que obliga a tal ocurrencia? O también: ¿está todo lleno de obligaciones?

A primera vista estas preguntas parecen más propias de la metafísica que de la física, más pendientes de una ideología que de un proyecto de investigación. Y quizá sea así. Pero la idea de la obligación como un caso límite de la idea de prohibición (más allá de la cual sólo existe la imposibilidad) sugiere, ahora lo creo, algo más. Por eso estoy a punto de dejar de escabullirme. La idea de prohibición contiene la idea de obligación. La obligación es un caso particular de los infinitos que tiene la prohibición. La prohibición es más general. Cualquiera de las leyes de la naturaleza conocidas puede expresarse en términos de un número finito de prohibiciones. Con las leyes de obligación ¡no ocurre lo mismo! Es decir: ciertas leyes de la naturaleza no pueden expresarse como un conjunto o sucesión finita de obligaciones. Decidir si una ley de la naturaleza tiene carácter de obligación o de prohibición quizá sea una cuestión de creencia. Pero el talante científico trata siempre de evitar un concepto infinito, y una ley de obligación pasa conceptualmente por el infinito.

El mirón de café

El carácter de la ley física [5], un libro del genial Richard Feynman, será recordado por dos o tres metáforas luminosas (que son la delicia diaria de miles de profesores de física). Una de ellas consiste en comparar el funcionamiento de la realidad con una partida de ajedrez y las reglas de este noble juego con las leyes de la naturaleza. La metá-

fora encaja aquí como si hubiera sido pensada expresamente para adornar los comentarios del párrafo anterior. La idea de Feynman es comparar al entrañable mirón de partidas de ajedrez de café con un científico volcado en el intento de comprender el mundo. Supongamos que el mirón, por lo menos al principio, no tiene idea de cómo funciona el juego. Lo mismo le ocurre, poco más o menos, al científico que afronta una nueva investigación. Pues bien, no es descabellado pensar que el primero, tras mirar cientos de partidas, llegue a descubrir todas las reglas del ajedrez, ni que el otro lo haga con las leyes de la naturaleza si atiende al comportamiento de la realidad. El mirón puede ahorrarse trabajo comprándose un manual elemental de ajedrez, pero el científico lo tiene peor, porque su trabajo interminable consiste justamente en contribuir a la escritura del *manual de la naturaleza*. Hasta aquí Feynman. Las buenas metáforas (y los buenos esquemas conceptuales) pueden estirarse más allá de la vigencia para las que se imaginaron. Estiremos, pues, un poco la metáfora (insisto en la inocencia de Feynman a partir de este punto).

Las reglas que regulan los movimientos de las piezas del ajedrez son reglas de prohibición. Una pieza en una posición determinada tiene, para la siguiente, cuadros permitidos y cuadros prohibidos. Los movimientos obligatorios se presentan por acumulación de prohibiciones en situaciones muy especiales del desarrollo del juego. En general, el jugador tiene libertad para escoger qué pieza quiere mover y adónde quiere llevarla. Esa libertad es la que nos permite hablar con cierto sentido de la táctica o la estrategia del jugador, de su genio, de su talento agresivo, conservador o combinatorio, de su creatividad, de su conocimiento de las aperturas, de su habilidad en los finales, de sus errores... Si las reglas fueran todas de obligación se jugaría siempre la misma partida. Si no hubiera ninguna restricción ganarían siempre las blancas en la primera jugada... El número de partidas diferentes que se pueden jugar es astronómico: un uno seguido de ciento veinte ceros, mucho más que el número de átomos que constituyen la materia del universo entero (ya de por sí escalofriante, del orden de diez elevado a ochenta, un uno seguido de ochenta ceros). En la práctica, se trata de un número infinito, incluso para la computadora más potente imaginable. En el desarrollo del juego cada movimiento hace que la partida tome un nuevo rumbo, un rumbo que elimina trillones de partidas posibles. Eso

equivale, en la analogía con el funcionamiento de la realidad, a la ocurrencia de un suceso entre los infinitos posibles permitidos por las leyes fundamentales de la naturaleza. Cuando un fenómeno se nos antoja impuesto por una ley determinista, como el tiro parabólico de un artillero, es porque estamos ante un caso de rarísima simplicidad. En general, la realidad es una trama de evoluciones posibles, una especie de nervura (adelanto una palabra nueva) en el terreno de las alternativas. En las evoluciones deterministas el tiempo es una ilusión, la historia no es un concepto trascendente. Tanto en una partida de ajedrez como en una evolución de la realidad, cada suceso redefine una trama de distinta frondosidad de alternativas. Ambos son procesos históricos, plagados de bifurcaciones, que caminan hacia su futuro. ¿Puede estirarse la analogía aún un poco más?

En el ajedrez, quien decide, dentro de lo permitido, es el jugador. ¿Qué o quién decide en un proceso real? La pregunta no deja de tener sentido y, al menos lingüísticamente, el problema no está resuelto. Nos encontraremos de nuevo con esta cuestión. En la selección artificial o cultural (ahora adelanto un concepto) selecciona el seleccionador, pero ¿qué o quién selecciona en la selección natural? El darwinismo no se ha librado del todo de esta pregunta circular cuando dice, como suele decir, que *la selección natural selecciona*. De momento, digamos únicamente que la decisión no la toma la ley, sino que se toma con el permiso de la ley. En otras palabras, el problema del sujeto de la selección es un falso problema. El concepto que se salva es el concepto común a uno y otro lado de la metáfora. Es el concepto «selección» en sí mismo.

En efecto, en ambos casos, en el ajedrez y en la naturaleza, asoma el concepto «selección». En el ajedrez existe un claro *objetivo*: ganar al adversario (otro jugador). ¿Y en un proceso real? ¿Se puede hablar de objetivo? Sólo en algunos casos en los que interviene un raro objeto llamado cerebro. En el resto, no puede hablarse de objetivo. Y sería recomendable no hacerlo ni siquiera como metáfora. ¿De qué podemos hablar entonces? ¿Quién hace ahora las veces de jugador adversario? En un proceso de la realidad no se trata de ganar a un adversario. ¿De qué se trata entonces? Quizá de algo parecido a seguir existiendo, tal vez ganar la posibilidad de perseverar en la realidad. (La eficacia es una idea que también resiste la metáfora, porque los fenómenos reales

tienden a minimizar la energía, y un jugador que puede ganar en dos jugadas no lo hace en tres.) Por cierto, se podría inventar un juego apto para científicos. En él, las reglas del juego no serían el punto de partida, sino el punto de llegada: un jugador las inventa, el otro las descubre.

Me decido por una de las alternativas del eterno dilema. Sí, el azar es un derecho intrínseco de la naturaleza. Y, en contra de lo que parecen sugerir las leyes más prestigiosas y brillantes de la física, el carácter de una ley fundamental es más una restricción que una obligación.

Tamaño contraste no puede dejarse así. Demos un par de vueltas más. A primera vista, la física sugiere más un mundo de obligaciones que un mundo de prohibiciones, mientras que la metáfora de Feynman parece promover la idea contraria. Apresurémonos a reconocer que en un platillo de la balanza tenemos el peso descomunal de las leyes más importantes y célebres de la física, y en el otro, la sugerencia de una simple metáfora llevada mucho más allá de lo que pretendía su genial creador. Vale, pero aún hay más.

La física suele expresar sus grandes leyes mediante ecuaciones diferenciales. Se trata de ecuaciones en las que aparecen no tan sólo las variables cuyas soluciones buscamos (posiciones, velocidades, concentraciones de sustancias, temperatura, distribuciones de masa, de carga, funciones de onda, etcétera) sino también sus variaciones en el tiempo y el espacio. Tales ecuaciones son deterministas en general, es decir, una vez fijado un estado cualquiera del sistema (valor de las condiciones iniciales y de contorno para cierto instante y lugar) todo queda perfectamente fijado para cualquier otro valor del tiempo y el espacio. Es el sueño de todo científico, la predicción, la anticipación. La solución existe, es única y pretende obligar a la realidad a satisfacerla. Una ley expresada por una ecuación diferencial es una ley de obligación. Son ecuaciones diferenciales la segunda ley de Newton para la mecánica clásica, las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo, la ecuación de Schrödinger para la física cuántica, la de Einstein para la teoría general de la relatividad... Con una escudería de leyes fundamentales como éstas para la realidad física, se comprende, sí, la tendencia a concebir la Constitución de la realidad como un paquete de obligaciones que no dejan margen para que algo como la selección pueda llegar a intervenir en los destinos del mundo.

Empezamos a desmontar esta visión de la realidad. En primer lugar, siempre existe un margen para la selección, aunque no sea el que afecta al gran dilema. Es el margen de la ignorancia. Hay un concepto de la física que, en mayor o menor medida, siempre está sujeto a la ignorancia. Se trata de las condiciones iniciales respecto del tiempo y las condiciones de contorno respecto del espacio. A veces nos olvidamos de ellas de tanto pensar la teoría. Pero no hay solución concreta que traducir en números (para cotejar con la observación) si no nos comprometemos con la selección de unos valores concretos para tales condiciones. Son las condiciones iniciales y de contorno las que acaban por determinar qué trayectoria en particular accederá a la realidad. En muchas situaciones, la libertad del sistema (o su impredecibilidad) radica justamente en ese margen de las condiciones iniciales o de contorno del sistema. En la práctica, el margen nunca es cero porque la precisión nunca es infinita. Y elegir una precisión finita equivale ya a una selección. En muchas situaciones de inestabilidad son (justamente) fluctuaciones infinitesimales de las condiciones iniciales las que deciden el futuro del sistema. En la práctica, hacer una predicción de la obligación dictada por una ley determinista requiere siempre una selección.

Pero no sólo en la práctica. No se trata sólo de una cuestión de ignorancia. El gran científico francés Henri Poincaré fue el primero en advertir las situaciones patológicas que pueden darse en los sistemas más fundamentales y sencillos descritos por leyes deterministas [6]. Poincaré (el asombroso Poincaré, que llegó a rozar la teoría especial de la relatividad independientemente de Einstein) quizá sea un buen precursor de lo que hoy llamamos la teoría del caos. Un comportamiento caótico se define precisamente como aquel que es sensible a las condiciones iniciales. (Éste es el tema que fascinó a Ilya Prigogine durante sus últimos años: el origen microscópico de la irreversibilidad. Prigogine ha rescatado recientemente los primeros trabajos de Poincaré. Volveremos enseguida a esta fascinante cuestión.)

Hay una expresión de las ecuaciones diferenciales que incluye el valor de las condiciones iniciales. Son los principios de conservación. Los principios de conservación (no todos descienden de una ley en forma de ecuación diferencial) son otra expresión del carácter más prohibitivo que obligatorio de las leyes más fundamentales de la física.

Magnitudes de la física como la masa (cantidad de materia) o la energía se conservan durante un proceso real. La ley es muy fuerte y muy útil para anticipar lo que puede pasar en una reacción química o una colisión de partículas. ¿Qué significa que una magnitud se conserva? Pues que podemos comparar el antes y el después de un suceso real y afirmar que tal magnitud es globalmente la misma. En una reacción química pueden ocurrir muchas cosas, pero no se viola el principio de conservación de la materia (la materia se transforma, pero no se crea ni se destruye), es decir, la suma de todas las masas antes debe coincidir con la suma de todas las masas después. Y lo mismo puede afirmarse de la energía, la carga eléctrica y, en determinadas circunstancias, la cantidad de movimiento o el momento angular. (El valor de energía total, la que se mantiene constante, por ejemplo, depende de las condiciones iniciales.) ¡Un proceso que viole o burle este principio no puede acceder a la realidad de este mundo! No se puede construir un motor que dé más energía de la que consume. El valor de la magnitud que se conserva viene fijado por el valor de las condiciones iniciales. Existen leyes de conservación que afectan sólo a objetos muy especiales y que sólo valen en condiciones muy especiales. Es el caso de la conservación del llamado número bariónico (la suma de bariones permanece constante durante todo proceso real) o del llamado número leptónico (la suma de leptones permanece constante). No hay, en cambio, leyes similares de conservación para otras partículas como los mesones o los fotones (el número de mesones o fotones antes del proceso no tiene por qué ser el mismo que el número de mesones o fotones después del proceso). En suma, incluso las leyes más deterministas pueden escribirse como una prohibición del tipo: «Tal proceso no puede ocurrir».

Existen otro tipo de verdades en la física de fuerte carácter prohibitivo. La temperatura de cualquier objeto real, por ejemplo, debe ser mayor que 0° Kelvin. Cualquier otra temperatura está prohibida en la realidad de este mundo. La velocidad de cualquier objeto real, otro ejemplo, no puede ser mayor que la velocidad de la luz, unos 300.000 kilómetros por segundo. Cualquier velocidad superior a la de la luz está prohibida en la realidad de este mundo.

O sea, si ahondamos en el carácter de la ley física, la idea de prohibición es más cómoda intelectualmente que la idea de obligación. La

prohibición representa bien el carácter de la ley física. La obligación es una ilusión en el límite de la prohibición. La metáfora de Feynman también se ajusta maravillosamente a esta idea. El ajedrecista, en general, tiene muchas opciones ante sí, a veces un número astronómicamente grande. De hecho, a medida que avanza la partida, el número de partidas distintas que aún se pueden jugar a partir de tal movimiento decrece de forma espectacular. La situación de «jugada forzada» existe en ajedrez, pero si tiene nombre es justamente porque se da en casos límite, como en la penúltima jugada de una partida que se resuelve con jaque mate, en situaciones de tablas por ahogamiento o por repetición de jugada... La situación de jaque mate (derrota) o de rey ahogado (tablas) significa que el siguiente movimiento es ya del todo imposible. Todos los movimientos están prohibidos. El jugador pierde porque ya no puede mantenerse en la realidad de este mundo. Se comprende que los jugadores de ajedrez acostumbren a abandonar el juego y reconocer su derrota antes que verse en la humillante situación de mover piezas forzadamente, una situación en la que su cerebro ya no tiene trabajo que hacer, nada que seleccionar.

Ocurre en la naturaleza, en el ajedrez, en el Derecho penal, en la ética, en el tráfico... La naturaleza tiene derecho intrínseco a una dosis de contingencia. Hay margen para la selección. En ella reside la creatividad de la evolución biológica, la del jugador de ajedrez, la (deplorada) de un delincuente o la (celebrada) de un artista. La metáfora de Feynman apuesta también por la visión de un mundo más sembrado de prohibiciones que de obligaciones. No es más que una metáfora. Es verdad. No demuestra nada. Pero ilustra mucho.

Demos ahora un gran salto para pasar de los átomos y el juego de ajedrez hasta el ser humano y su vida cotidiana. Aceptemos que optar por una de las dos respuestas, en el dilema del papel del azar en la naturaleza, es esencialmente un asunto de creencia. Pues bien, yo diría que, puestos a creer, también es más cómodo creer en un mundo de prohibiciones que en un mundo de obligaciones. Se puede ser feliz en un mundo de prohibiciones. La prohibición es un buen estímulo para la creatividad humana. Un mundo de obligaciones, por el contrario, deja a nuestro cerebro sin trabajo. Nos obligaría a una vida sin sentido, patética, sin margen para la creación ni la responsabilidad de ningún signo...

La idea de la ley física como una prohibición más que como una obligación proporciona una visión particular de la realidad. Podemos acceder a esta visión con otra buena metáfora, la que procede de la regulación del tráfico rodado. El conjunto de las leyes que gobiernan el mundo equivale a la idea de un territorio enmarañado de caminos que se entrecruzan, algunos con señales de prohibido el paso. No hay señales de dirección obligatoria. Son superfluas. Cuando aparece una dirección obligatoria en una bifurcación de caminos es porque todas las demás direcciones están señalizadas con una señal de prohibido el paso. La metáfora tiene su fuerza porque una maraña de caminos cuyo tráfico está regulado por señales de prohibido el paso no puede sustituirse por una maraña con señales de dirección obligatoria. Lo contrario, en cambio, sí es posible. Ilustramos de nuevo que la prohibición es más general que la obligación. Tal es el paisaje de eso que hemos llamado la Constitución de la realidad, un sembrado de señales de prohibido el paso que marca caminos o regiones prohibidos y caminos y regiones permitidos. Existen territorios sin ley. Y nos interesan estos territorios. En ellos la realidad evoluciona a merced de la no ley. Para designar el territorio que liberan las prohibiciones podemos usar, de momento, el término «azar» o «incertidumbre». Esta visión del mundo es compatible con la noción de novedad y con la noción de evolución no escrita. Y en ella, entre la no ocurrencia y la ocurrencia de un suceso, surge de nuevo, fresca, la idea de selección.

Ser o no ser determinista, ¿una cuestión de creencia?

El pensador determinista de corazón, como Einstein, como Spinoza, prefiere pensar en una Constitución de la realidad repleta de restricciones, sin el más tímido resquicio para el azar. En ella el ámbito de lo posible se reduce a una evolución única y prescrita. Cualquier duda es por torpeza o ignorancia del observador. En esta visión, toda presunta incertidumbre es aparente, una ilusión, o una consecuencia de los límites de nuestra paciencia a la hora de observar el mundo. Veamos cómo queda la postura aquí adoptada en relación con la postura determinista. Para ello clasifiquemos la realidad en tres clases. La clase A es la realidad sin leyes, la realidad en la que todo vale, en ella todo es

azar. La clase B es la realidad con restricciones y con cierta dosis no nula de azar. Vale con permiso de la ley. La clase C es la realidad límite en la que todo es ley y cuya dosis de azar es nula, la solución es única. Sólo vale lo que está escrito. Y, por último, la clase D es la clase regulada por leyes incompatibles entre sí. En ella nada vale. Es el conjunto de objetos y procesos no reales.

Empecemos por descartar esta última. Nosotros partimos de la hipótesis del mundo real, mientras que la alternativa D la niega.

La realidad tipo C es una visión del mundo que encoge el alma de unos y alivia la de otros. Pensadores como Einstein [7] o Spinoza [8] se sienten cómodos en este caso límite. Einstein, Spinoza o Dostoievsky encuentran consuelo en la idea de que la condición humana no es, en el fondo, responsable de nada. Ni siquiera tiene la facultad de tirar de los hilos de su propio futuro. Todo está escrito en alguna parte. No existe la responsabilidad, pero tampoco la culpabilidad. No existe la bondad, pero tampoco la crueldad. No existe la mediocridad, pero tampoco la creatividad. Todo es una ilusión, aunque la ilusión sea tenaz. Lo que tiene que ocurrir sencillamente ocurre.

Otros autores, como Darwin, Borges o Boltzman, se sienten más cómodos en una realidad del tipo B, una realidad con cierto derecho a la contingencia, una realidad plagada de bifurcaciones donde se puede, se debe elegir. ¿Cuestión de ideología? Se puede asegurar, creo, que las grietas del método científico se llenan con pasta de ideología. Veamos, por ejemplo, cuál es la visión del mundo que se obtiene si nos deslizamos suavemente de la opción C a la opción B. Vamos a dar este paseo sin salir de la física. La manera más sencilla de obtener una complejidad es construir una población de objetos simples. Así pasamos de un átomo a un gas ideal. Así pasamos de la mecánica de una partícula a la teoría cinética de los gases, la mecánica estadística y la termodinámica. Pensemos en los principios fundamentales de la termodinámica. Son tres. El primero, como bien se sabe, se refiere a la conservación de la energía. La energía puede adoptar muchas formas, pero en el balance total siempre salen las cuentas. La energía se transforma pero no emerge de la nada ni se pierde sin que sepamos de qué manera. Un proceso particular puede evolucionar de infinitas maneras, pero ninguna de ellas puede mostrar un déficit o superávit global de energía. Es el precio que todo proceso debe pagar para ser un proceso

real. Ningún proceso de la realidad escapa a este principio. Es una prohibición (restricción) pero aún deja mucha libertad. El segundo principio introduce restricciones suplementarias sobre todo proceso que aspire a ser real. Respetar el primer principio es necesario, pero no basta para ser real, también se ha de respetar el segundo.

Existen procesos imposibles que conservan la energía. Es el caso de un barco que funcione indefinidamente por el procedimiento de extraer calor del mar. El calor que obtiene el barco es exactamente el que pierde el océano. La energía se conserva (el mar se enfría de forma imperceptible), pero se trata de un objeto que jamás accederá a la realidad (un barco así nunca funcionará) porque está prohibido por el segundo principio de la termodinámica. Éste se refiere a la entropía. En un sistema aislado, la entropía no puede disminuir. A diferencia de la energía, la entropía es una magnitud que no tiene por qué conservarse (se puede seguir este razonamiento sin entrar a saber en qué consiste esta magnitud). De hecho, el segundo principio anuncia que la entropía se genera sin cesar en el universo. Cualquier cambio reversible (lo bastante suave como para que todos los estados intermedios del proceso sean estados de equilibrio) mantiene el valor de la entropía; cualquier cambio irreversible (de hecho, cualquier cambio real) la hace aumentar. Un barco que funcione extrayendo calor del mar cumpliría con las restricciones de energía pero no con las de entropía. En esta visión B del mundo, cumplir la ley significa respetar las prohibiciones. Ocurre lo mismo con un ciudadano respecto del comportamiento que regula el código penal. La ley no obliga a un comportamiento determinado. La ley prohíbe ciertos comportamientos. El ciudadano tiene la opción de actuar legal o ilegalmente. Pero hay muchos comportamientos legales posibles. Un objeto o suceso puede ser real o no serlo. Y hay más de una manera de ser real. Emerge la noción de selección. ¿Quién o qué selecciona y con qué criterio lo hace? A eso vamos. Algo se intuye, sin embargo, no toda selección permite acceder a la realidad y no toda selección permite permanecer en ella con igual probabilidad.

Nos adentramos ahora en realidades del tipo B más alejadas del límite determinista. Imaginemos una situación muy familiar para nuestra intuición: un animal hambriento en busca de comida. Las restricciones de la Constitución de la realidad pueden ser muchas, pero el dominio no regulado puede ser todavía muy grande. Un ser vivo en la

necesidad de comer y no ser comido (¿hay alguna situación más general?) se enfrenta a una gran variedad de soluciones posibles. Una cebra que descubre el arranque de la carrera de una leona hambrienta no puede volar, ni enterrarse, ni subirse a un árbol... su dominio de incertidumbre se reduce a huir corriendo por la llanura. Sin embargo, puede elegir uno de los muchos comportamientos permitidos por la Constitución de su realidad. Puede correr en infinidad de direcciones, puede correr en zigzag para aumentar la probabilidad de que el depredador fracase en su último salto. Puede elegir separarse de sus compañeras confiando en que la leona seguirá al grupo y se olvidará de ella, puede elegir perderse dentro del grupo y confiar en que otra cebra correrá menos que ella, etcétera. De las infinitas alternativas, ocurrirá lo que ocurrirá según la decisión que tome el animal. Acceder y permanecer en la realidad requiere la idea de selección.

Si continuamos adentrándonos en la opción B de la realidad quizá nos tropecemos con un individuo dotado de inteligencia abstracta. Quizá le sorprendamos preguntándose a sí mismo por el significado de libre albedrío, por el significado de conceptos como la responsabilidad, la culpabilidad o la creatividad, por la idea de innovación... Todas estas cuestiones se renovaron poco después de que Newton deslumbrara al mundo con sus leyes de la mecánica. Laplace quizá fuera el primero en destilar, del comportamiento de los cuerpos celestes, una visión del mundo aplicable a cualquier complejidad de este mundo.

Y llegamos al otro extremo de las realidades B. Es la realidad del tipo A: hemos relajado tanto las restricciones que ya no queda ninguna. Es el límite del dominio sin restricciones, donde todo vale, donde el azar campa a sus anchas. Los objetos de esta realidad ni siquiera se ven influidos por los objetos vecinos. Los sucesos no dependen ni de su propia historia. Del nada vale (imposibilidad) hemos pasado al todo vale. Pero el mundo tampoco es así. Si así fuera, el mundo tendría otro aspecto: uniforme, equiprobable. Y en él no podría existir nada ni nadie capaz de hacerse una sola pregunta. Además, ya es tarde para aferrarse a esta idea. La ciencia ya ha sido capaz de descubrir muchas dependencias, muchas regularidades, muchas restricciones y muchas leyes, y algunas de ellas ya han probado su capacidad para anticipar la incertidumbre.

En pocas palabras, el conjunto de las leyes fundamentales de la naturaleza está en algún punto a medio camino entre los dos extremos: el «nada vale» y el «todo vale». Los dos extremos son dos casos únicos con infinitos intermedios. Un extremo corresponde a la creencia determinista, el azar es el producto de nuestra ignorancia. El otro extremo es sencillamente falso. Optar por el azar como un derecho intrínseco de la naturaleza es, pues, *infinitamente* más sensato. Hemos revoloteado en torno a esta pregunta: «¿Es el azar un producto de nuestra ignorancia o un derecho intrínseco de la naturaleza?»... y ya nos hemos posado sobre una de las respuestas. No se trata de creer o no creer en ella. Digamos que la aceptamos como hipótesis de trabajo para lo que queda de este ensayo. Las hipótesis de trabajo no son verdaderas o falsas, son sensatas o insensatas, funcionan o no funcionan. Si aceptamos que una ley es una restricción para acceder o permanecer en la realidad y que no todo está lleno de ley, entonces siempre queda un dominio en el que tiene sentido hablar de un importante concepto: la selección. Nuestro esquema conceptual se enriquece en un punto y surgen nuevas preguntas:

¿Cuál es la relación entre azar y selección? ¿Cómo se confirma la permanencia de los objetos y fenómenos que acceden a la realidad? ¿Cuál es la dosis de azar de la realidad? ¿Se puede hablar de más de una realidad?

A eso vamos.

3
Individualidades e individuos
en la nervura de lo real

Hablar de la Constitución de la realidad como el conjunto de todas las leyes fundamentales de la naturaleza y hablar, al mismo tiempo, de más de una realidad suena a contradicción. En efecto, lo mínimo que se le puede pedir a la Constitución de una realidad es que sea única, que se aplique a cualquier realidad o a cualquier porción de realidad. Se trata de una vieja cuestión de la física y de una —no tan vieja— cuestión de la biología cuya raíz encontramos incluso en el significado que damos a la idea de *comprender*.

Imaginemos en nuestro horizonte un objeto, por ejemplo un árbol rodeado de otros árboles. Sólo por eso parece que ya tenemos derecho a hablar de *una* realidad, la de un árbol en particular separado de sus vecinos. Visto así, *una* realidad es un pedazo separado de *la* realidad. No parece haber problema en eso. La Constitución de la realidad no debe cambiar de un pedazo a otro pedazo contiguo. Las leyes fundamentales que regulan el funcionamiento de un árbol se conservan de un árbol a otro.

Pero un mismo pedazo de realidad puede considerarse, a su vez, como otra familia de realidades, una dentro de la otra. Porque puedo observar la realidad del árbol acercándome más o acercándome menos. Si me alejo, el árbol acabará perdiéndose definitivamente en el bosque. Si me acerco hasta llenar mi percepción con la corteza del tronco, el árbol también acabará por salirse del escenario. Y si me acerco más todavía, entonces es posible que la realidad se me llene de microorganismos. Y si continúo forzando el zoom, igual entro en el dominio de los nanoobjetos y resulta que el objeto típico de mi realidad es una molécula. O un solo átomo. O una partícula elemental. Elegir un nivel concreto de observación equivale de hecho a elegir, de nuevo, *una (otra)* realidad. ¿Qué ocurre ahora con la Constitución de esa otra realidad?

Sin electrones no hay tranvía

Las leyes que regulan el movimiento de un tranvía no se parecen a las leyes que regulan el movimiento de un electrón. Sin embargo, sin electrones no hay tranvía. Nos enfrentamos ahora a pedazos de materia, uno dentro de otro, que por lo tanto comparten cierta región del espacio y el tiempo, pero que están regulados por leyes diferentes. Estamos, en principio, ante diferentes constituciones de realidad. La ciencia ha desarrollado diferentes disciplinas para estas clases de realidad. La ciencia no renuncia a conectar unas con otras. Se trata incluso de una de sus grandes ambiciones: la búsqueda de la Constitución de la realidad más general de donde se deducirían todas las demás como casos particulares.

Así que, de momento, para comprender hay que empezar por decidir desde qué nivel de observación pretendemos comprender. Veamos algunos casos tan sencillos como célebres.

Consideremos en primer lugar la materia en su nivel más fundamental, el de las partículas elementales, los átomos o, si se quiere, las moléculas. Los cambios que pueden experimentar estos objetos están regulados por una Constitución de la realidad que incluye la mecánica cuántica y la aproximación relativista. Pero también podemos apartarnos, con ese zoom imaginario, y considerar un objeto mucho mayor y más complejo, como el canto rodado de un río. Los cambios que puede experimentar este otro objeto —caer ladera abajo, chocar con otras piedras vecinas, sufrir el arrastre de una riada o abrasiones y cambios de las condiciones ambientales, y quizá llegar a transformarse en un grano de arena en el fondo del mar— dependen en último término de las mismas leyes de la naturaleza que afectan a sus partes íntimas, pero ninguna mente sensata se embarcaría en describir el movimiento combinado de cuatrillones de partículas con sus intrincadas interacciones mutuas. La aventura de sumar lo microscópico para describir lo macroscópico es aquí del todo inabordable. En lugar de ello, se pueden buscar las leyes *fundamentales* que regulan los acontecimientos en el mismo nivel macroscópico, como las leyes de la mecánica de Newton, las de la hidrodinámica, etcétera. En otras palabras, como la Constitución de la realidad en el nivel microscópico es inaplicable en el macroscópico, nos fabricamos otra Constitución de la realidad que nos

permita comprender los episodios que observamos en el nivel macroscópico. Las interacciones en el primer mundo son entre partículas o átomos; las interacciones en el segundo son entre piedras.

De hecho, la física se ha ido construyendo de este modo: a pedazos. Según sea el nivel de observación (en física hay básicamente dos, el microscópico y el macroscópico) y según sea la complejidad de los objetos en escena, se describen diferentes *realidades*. Así se han escrito las diferentes teorías, la mecánica, la óptica, el electromagnetismo, la termodinámica del equilibrio, la termodinámica del no equilibrio, la física atómica, la teoría del caos, etcétera. El reto intelectual de una teoría final que lo unifique todo, el sueño de Einstein, sigue siendo una aspiración legítima de la física, y hay que reconocer avances en esta dirección [9], [10] y [11].

Ahora bien, la cuestión de conectar la realidad microscópica con la realidad macroscópica no es sólo una cuestión cuantitativa, una dificultad de cálculo. En ocasiones aparecen diferencias cualitativas y conceptuales aparentemente insuperables. Las respectivas constituciones de uno y otro nivel de la realidad, de una y otra realidad anuncian a veces comportamientos irreconciliables. ¿Cómo puede ser eso posible si las leyes de una contienen de alguna manera las de la otra?

El físico austriaco Ludwig Boltzmann protagonizó el primer y más célebre caso, el de un gas no demasiado denso. Observemos el comportamiento de esta realidad según dos niveles de observación bien diferentes. En el primero miramos y pensamos microscópicamente. Lo que vemos son unas partículas que obedecen a las leyes de Newton de la mecánica clásica. En el segundo miramos y pensamos el mismo sistema, pero lo hacemos macroscópicamente. Lo que vemos ahora es un fluido que obedece las leyes de la termodinámica. Queremos comprender un mismo objeto y sus mismos cambios. Se trata del mismo objeto visto en dos niveles distintos. Se trata de un mismo objeto traducible a dos realidades distintas. Y queremos comprender lo que vemos en ambos casos. Queremos comprender ambas realidades. La comprensión puede abordarse de dos maneras, desde abajo, aplicando trillones de veces las leyes de Newton; o desde arriba, aplicando una sola vez los llamados principios de la termodinámica.

Ya hemos admitido que lo primero es una empresa humanamente imposible, pero al menos conceptual y cuantitativamente, las dos des-

cripciones no deberían contradecirse. Sin embargo, eso es lo que parece suceder al comparar el comportamiento de las evoluciones en el tiempo de ambos niveles. Según la física de Newton, el movimiento de una partícula es reversible. Esto significa que el tiempo es simétrico respecto del futuro y del pasado. Si, por ejemplo, invertimos el signo de la velocidad de una partícula, ésta desandará la trayectoria de ida en su trayectoria de vuelta y volverá a pasar por las posiciones visitadas con la misma velocidad, pero en sentido contrario. Así se comportan las bolas de billar. A nadie le sorprende presenciar la proyección de la película de una carambola en el sentido inverso al que ha sido filmada. En las ecuaciones de Newton el tiempo se invierte sin problemas, el efecto de cambiar el signo del tiempo tiene una solución perfectamente realizable. Lo mismo puede decirse, por extensión, de un sistema de ecuaciones que describe dos partículas, o tres, o mil, o un millón... Sin embargo, según el segundo principio de la termodinámica, el tiempo no es simétrico respecto del pasado y el futuro. El tiempo se despliega desde el pasado hacia el futuro. En el lenguaje de los físicos se ha consolidado la expresión *la flecha del tiempo*. En sistemas de muchas partículas aparece algo que no existe en sistemas de pocas partículas, la flecha del tiempo.

Es lo que ocurre en otro famoso experimento. Se trata de dos recipientes conectados entre sí por un tubo. Uno contiene un gas de trillones de partículas y el otro está vacío. Si conectamos ambos recipientes, las partículas viajarán de uno al otro hasta que se igualen las presiones de ambos lados. A partir de ese momento se alcanza el llamado equilibrio termodinámico. Macroscópicamente hablando, diríamos que ya ha ocurrido todo lo que podía ocurrir. Microscópicamente, tampoco observaremos un ulterior transporte neto de material de un recipiente a otro (veremos tantas partículas viajando en un sentido como en el contrario). Sin embargo, según la Constitución de la realidad microscópica (según la física newtoníana), la inversión de las velocidades de todas las moléculas debería conducir a la situación inicial. Pero la situación inicial implica uno de los recipientes vacío. Ni el físico más optimista se sentará a esperar a que un recipiente se vacíe espontáneamente a costa del otro. He aquí la (por lo menos) aparente contradicción entre ambas realidades.

Como diría Ilya Prigogine (enamorado de esta cuestión en la última etapa de su vida) [12], la irreversibilidad del tiempo se debe, se-

gún esta manera de ver las cosas, a los límites de nuestra paciencia. El tiempo en la realidad microscópica es reversible. El tiempo en la realidad macroscópica es irreversible. Según la Constitución de la realidad macroscópica (según la segunda ley de la termodinámica), los procesos están sujetos a la flecha del tiempo, y el regreso espontáneo del gas homogéneamente repartido a la situación inicial está expresamente prohibido. Según la Constitución de la realidad microscópica (según las leyes de la mecánica), los sucesos son reversibles y el regreso a la situación inicial está permitido. No hay paradoja dentro de ninguna de las dos realidades. La paradoja aparece en cuanto se desea conectar una realidad con otra, en particular, cuando se quiere deducir la una de la otra. La termodinámica no se deduce de la mecánica. La ambición de disolver la paradoja del tiempo es legítima y plantea cuestiones de altísimo interés científico y filosófico. En principio, parece que hay dos alternativas para resolver la contradicción: o sumamos mal buenos sumandos o sumamos bien sumandos equivocados: ¿cuál es el origen de la irreversibilidad? ¿Aparece la irreversibilidad a la hora de sumar un gran número de reversibilidades? O por el contrario: ¿tiene ya la irreversibilidad una raíz en alguna singularidad de lo reversible, incluso en el nivel de lo más simple y elemental? Es decir: ¿no será que hemos de revisar y superar la física fundamental de Newton, Einstein y Schrödinger, todas temporalmente reversibles para una partícula, y buscar otra física fundamental más precisa que ya incluya la irreversibilidad temporal en sus niveles más fundamentales?

Tal es la provocadora posibilidad que lanzaba Prigogine en los últimos años de su vida [6]. Vale la pena detenerse a pensar un poco en este dilema. La primera postura, la que defiende la mayoría de físicos, sugiere que la Realidad puede expresarse desde varios niveles distintos con leyes distintas difícilmente reducibles entre sí (aunque se trate de la *misma* Realidad). Es decir, la Realidad tiene varias manifestaciones relevantes, en cada una de las cuales luce su propia Constitución. La segunda postura, la que defiende algún físico audaz, sugiere que la Realidad es única y única su Constitución; es decir, sus leyes fundamentales corresponden a su nivel de constitución más elemental y de ellas se deducen con mayor o menor dificultad las diferentes leyes aparentes de los otros niveles.

Analicemos otro ejemplo: la mezcla de agua con tinta roja. Se trata de dos recipientes iguales unidos por un tubo donde está instalado un grifo en posición de *cerrado*. En uno hay agua clara y en el otro tinta roja. Abrimos el grifo y dejamos que ambos líquidos se mezclen de forma espontánea. Ahora observemos el proceso de dos maneras, *a)* a simple vista (nivel macroscópico) y *b)* con un potente zoom que nos permita seguir la evolución de las partículas de los líquidos una a una (nivel microscópico). En el primer caso veremos como, poco a poco, el agua clara se mezcla con la tinta roja hasta alcanzar un color único rosa uniforme, intermedio entre los dos iniciales. Pero ni el físico más optimista se sienta a esperar que todo vuelva a la situación inicial, es decir, que un recipiente se torne por entero rojo y el otro se torne del todo claro y transparente (momento de cerrar otra vez el grifo y aquí no ha pasado nada).

De nuevo constatamos que, en el proceso visto macroscópicamente, el tiempo va del pasado al futuro; el proceso es irreversible. Pero si contemplamos el proceso en su nivel microscópico y seguimos la evolución de una molécula particular, observaremos que todo funciona según predice la física de partículas: va en línea recta hasta que choca con la pared del recipiente o con otra partícula de igual o distinto color, intercambia energía y cantidad de movimiento según las reglas de la mecánica, etcétera. Tan probable será ver una partícula en una dirección como en otra y si una invierte su velocidad desandará tranquilamente su historia para repasar por donde había pasado. Ahora el proceso, el mismo que antes hemos juzgado irreversible en el nivel macroscópico, resulta que es reversible en el nivel microscópico. ¿Contradicción? Todo objeto llamado partícula obedece a una física reversible, pero el objeto formado por trillones de partículas interaccionando entre sí obedece a la vez a otra regla macroscópica claramente irreversible. ¿Dónde se ha roto la irreversibilidad? Hemos observado de diferente manera, eso ya lo sabemos, pero ¿en qué difieren esas maneras de observar para que el observador microscópico vea un proceso reversible y el macroscópico vea uno irreversible?

La reversibilidad microscópica versa sobre partículas, más exactamente sobre configuraciones de partículas en posiciones bien determinadas con velocidades bien determinadas. Si un solo dato de una posición o de una velocidad de una sola partícula cambia, cambia la

configuración. En este nivel cada configuración se ve y se cuenta como diferente y no hay posibilidad de confundir dos configuraciones distintas. La propiedad rojo o blanco (un color o el otro) es una propiedad de cada partícula, pero la conclusión de que el proceso es reversible no se refiere sólo al color, sino a una configuración particular. La irreversibilidad macroscópica no versa sobre partículas, sino sobre elementos de volumen que contienen trillones de partículas en interacción. Pero ahora la propiedad rojo o blanco admite todos los matices intermedios y no es una propiedad de una partícula (un concepto inobservable macroscópicamente), sino de ese elemento de volumen que contiene trillones de partículas. Y la conclusión de que a este nivel macroscópico el proceso es irreversible se refiere sólo al color de un objeto para el que valen como iguales (o sea, indistinguibles, ¡y aquí está el quid de la cuestión!) trillones y cuatrillones de configuraciones que microscópicamente contamos como diferentes. Es decir, perdemos información ¡y aceptamos esta pérdida!

Dicho con otras palabras, para cada estado del proceso, observado microscópicamente, sólo vale una configuración particular de partículas, mientras que para cada estado del mismo proceso, observado macroscópicamente, valen trillones de configuraciones (microscópicamente) diferentes pero equivalentes (macroscópicamente). Es decir, consideramos la misma realidad, pero en ella consideramos objetos distintos que, además, observamos y medimos de diferente manera: posiciones, velocidades y color (rojo o blanco) de partículas cuando hablamos microscópicamente; color (de todo un gradiente entre rojo y blanco) de elementos que contienen muchas partículas cuando hablamos macroscópicamente. La reversibilidad depende de una observación fina y se pierde al perder la finura de la observación. Al saltar del nivel de las partículas (de uno de dos colores) al nivel de un elemento de volumen (con gama continua de colores) perdemos una cantidad enorme de información. Los nuevos objetos y sucesos caracterizados por nuevas magnitudes siguen ¡nuevas leyes! Tenemos dos constituciones que nos permiten comprender dos realidades, o si se quiere, dos visiones diferentes de una misma realidad. En el mundo microscópico podemos tener partículas y mecánicas reversibles con variables como posiciones, velocidades, funciones de onda, etcétera. En el mundo macroscópico podemos tener gases y termodinámica con variables como

la densidad de masa y la temperatura. Magnitudes como la temperatura, el calor o la entropía ni siquiera están definidas para una partícula.

Como vemos, la irreversibilidad macroscópica en la que vivimos y que alimenta nuestra intuición se explica sin necesidad de recurrir a la existencia de presuntas inestabilidades en el nivel fundamental. En otras palabras, puede existir irreversibilidad del tiempo en nuestro mundo, sin necesidad de que la haya en el mundo de las partículas de las que estamos hechos. Pero ¿cuál es el interés de considerar más de un nivel de observación de una misma realidad? Cada nivel de observación tiene su propia inteligibilidad. En muchas ocasiones incluso interesa perder información. Por ejemplo, ¿de qué me sirve conocer las posiciones y velocidades de trillones de moléculas de aire en la calle, si lo que en verdad me interesa es saber si me llevo, o no, la bufanda al salir de casa? ¿De qué le sirve a un sociólogo interesado en comprender las migraciones humanas el hecho de conocer los detalles del metabolismo de las células eucariotas, aunque toda persona está constituida por este tipo de células?

La realidad tiene una estructura, una estructura con varios niveles de observación relevantes. Cada nivel relevante induce una subrealidad con sus propias leyes, una subrealidad con su propia subconstitución. La estructura de la realidad está compuesta de realidades que se contienen las unas a las otras, como las famosas muñecas rusas. La siguiente pregunta —siempre hay una siguiente pregunta— es saber cuántas de estas realidades son relevantes, es decir, cuántas pueden ser útiles a la hora de comprender el mundo.

La discusión entre el mundo microscópico y el macroscópico en física tiene lugar sólo entre dos niveles. Nos ha servido para hacernos cargo del problema y de la existencia de paradojas en el tránsito de una realidad a otra. Nos ha servido para constatar que el mundo se puede comprender con esas diferentes realidades funcionando cada una con sus propias leyes y principios; es decir, cada realidad con su propia constitución. Dos niveles diferentes de observación introducen dos realidades distintas de una misma realidad. Las dos subrealidades se basan en objetos distintos que se describen con magnitudes distintas según leyes diferentes. En una el objeto típico puede ser una partícula, en la otra un volumen de gas; en una se usan magnitudes como las posiciones y velocidades, en la otra magnitudes como la temperatura, el

color, el calor o la entropía; en una el objeto típico puede ser una célula y las leyes de comportamiento celular, en la otra un jugador de Bolsa y las reglas que regulan la compraventa de valores...

Las leyes de las constituciones de ambas realidades se refieren a objetos y sucesos diferentes y *hablan* con palabras de distintos idiomas. Es el momento de recurrir de nuevo a la metáfora de una visión del mundo constituida por caminos y señales de prohibido el paso. Los caminos son los procesos posibles, las señales de prohibido el paso son las leyes de la constitución correspondiente. Un mismo territorio puede organizarse según diferentes redes viarias de autopistas, carreteras, caminos... Se trata de una red similar a las de transporte de materia en el mundo inerte y en el mundo vivo. Es el sistema circulatorio de los animales con la aorta, las arterias, los vasos, los capilares... Es una cuenca fluvial con el río desde su desembocadura, los afluentes, los afluentes de los afluentes, los riachuelos... Cada una de estas posibles redes lleva adscrita un sistema propio de señales de tráfico que la hace viable. La dificultad para pasar directamente de un sistema a otro no excluye su viabilidad y ni su trascendencia nivel a nivel. En el caso de la materia inerte existen sólo dos niveles relevantes (quizá tres), el mundo microscópico y el macroscópico (y quizás el de las fluctuaciones). En el caso de la materia viva, sin embargo, la estructura de la realidad en subrealidades relevantes se enriquece de forma notable. Los dos niveles de la materia inerte están muy alejados entre sí y su conexión es difícil. Los niveles de la materia viva son más y están más próximos entre sí.

Pensemos en la siguiente secuencia de niveles: gen (nucleótidos del genoma), bacteria, célula eucariota, organismo de billones de células, familia, manada, sociedad, ecosistema, biosfera... La verdad es que, por desgracia, no disponemos aún de demasiadas leyes que merezcan llamarse fundamentales en ninguno de estos niveles de organización. En los niveles fundamentales, donde los objetos de la realidad son moléculas que interaccionan con otras de su misma y diferente especie, reinan la física y la química. Pero conocemos menos reglas sobre las aventuras y desventuras de una bacteria que interacciona con otras de su misma especie y con otros microorganismos que la pueden devorar o servirle de alimento, que tiene mayor o menor capacidad para detectar gradientes químicos o de luz, etcétera. Un organismo, como un árbol o un pájaro, es un objeto propio de un nivel de descrip-

ción superior. Está claro que las leyes que regulan la vida de un árbol o de un pájaro serán muy difícilmente deducibles de las leyes del mundo de las células eucariotas, aunque éstas sean los auténticos ladrillos de la estructura de árboles y pájaros...

La Realidad acaso sea una, pero ¿cuántas realidades relevantes se pueden pensar según sea el nivel de observación? ¿Una?, ¿dos, mil, infinitas? Se pueden pensar infinitas realidades, pero no tantas si además exigimos que éstas sean relevantes para la comprensión del mundo. Hablar de materia viva puede ser un abuso de lenguaje, sobre todo en los niveles más fundamentales, porque la materia viva está constituida por los mismos elementos últimos que la materia inerte. Es decir, la materia viva está hecha de materia inerte. No hay ninguna partícula elemental ni ningún átomo de la materia viva que no pueda encontrarse en la materia inerte. Sin embargo, al ir escalando la complejidad jerárquica de la vida se hace evidente que la materia viva se organiza según ciertos objetos de la realidad que no se encuentran en otros niveles de observación. La cuestión empieza a diferenciarse en el nivel molecular.

Muchas moléculas de la materia viva se encuentran en objetos inanimados, pero no todas, en particular las moléculas más grandes. Luego le toca el turno a objetos tales que ellos mismos se bastan para nombrar todo un nivel de observación, toda una realidad: célula, organismo, familia... Son unidades relevantes con interaccciones mutuas relevantes. Son, si se quiere, *individuos*. No todo nivel de observación define una realidad relevante, no todo nivel tiene un individuo que lo identifica. Un simple agregado de un millón de bacterias no define un individuo. Una planaria, en cambio, es un gusano de unas mil células capaz de interaccionar relevantemente con sus alrededores o con otros organismos similares. Una colonia de hormigas se acerca más a la idea de individuo (a veces se ha llamado «superorganismo» a una sociedad de insectos) que una manada de ñúes. Nuestro esquema conceptual gana un nuevo concepto, el de individualidad. ¿Qué es una individualidad?

La intuición nos dice que un átomo o un cubo de pirita, un pájaro o un árbol son objetos que están más cerca de la idea de individualidad que un montón de arena, un hígado o una hoja. Adelantemos la siguiente idea: ciertos objetos tienen una independencia y una estabili-

dad suficientes para que su interacción mutua resulte relevante, para que su consideración aporte conocimiento de la realidad a la que pertenece. La individualidad está muy relacionada con otro de los conceptos fundamentales del esquema que tratamos de construir: el concepto de selección. Como veremos, un individuo es por lo menos eso: una unidad evolutiva, la clase de objetos que tiende a favorecer cualquier clase de selección. Las partículas elementales son individualidades que pueden interaccionar para crear una nueva individualidad llamada átomo. O no. Los átomos son individualidades que pueden combinarse para dar lugar a una nueva individualidad llamada molécula. O no. Las moléculas son individualidades que pueden organizarse para dar lugar a un cristal. O no. Las bacterias son individuos que se reúnen para formar agregados informes, pero que no parecen reunirse para definir un organismo pluricelular. ¿O sí? Nos detendremos en esta posibilidad.

Las células eucariotas se organizan para construir infinidad de nuevos individuos como los animales y plantas. Y pueden no hacerlo y perseverar como células. La suma simple de individuos no da un nuevo individuo... Un búfalo es más individuo que una manada, pero quizá también lo sea más un hormiguero que una manada, aunque el hormiguero lo sea menos que una hormiga... Como se habrá notado, hemos cambiado la palabra individualidad por la de individuo al atravesar la frontera de los seres vivos. La idea de individualidad o de individuo no cambia con continuidad, sino discretamente, a saltos. Sin embargo, la idea parece tener grados...

Perseguimos una buena definición de individuo, y para esta tarea conviene alimentar la intuición. La historia que traigo ahora a colación es nutritiva para lo que nos ocupa.

La escala de la individualidad

Hace no mucho tiempo, en una visita a mi amigo Henrique Lins, de Río de Janeiro, tuve noticia de un curiosísimo organismo. Lo llamaré así (organismo), aunque muchos biólogos preferirían llamarlo de otro modo, «colonia», por ejemplo [13]. Lo que sigue es una lista de las características que presenta este ente vivo pescado en las aguas poco saludables de una laguna de la ciudad:

1.° El organismo está compuesto por entre veinte y cuarenta células procariotas (bacterias) y su forma es la de una esfera perfecta.

2.° Las bacterias de las que se compone son bacterias magnetotácticas (tienen cristales de magnetita en su interior, de los que se sirven para orientarse).

3.° Las bacterias están dispuestas en una sola capa exterior que deja un espacio central libre.

4.° El organismo se mueve a altas velocidades (mayores que las de las bacterias individuales) girando sobre sí mismo con movimientos claramente no aleatorios.

5.° Los organismos se comunican entre sí, como lo demuestra el hecho de que unas esferas imitan los movimientos de otras o el cuidado con que se aproximan entre sí, etcétera.

6.° Nunca se han encontrado las bacterias que componen el organismo moviéndose de forma individual y libre.

7.° No se ha conseguido cultivarlas en el laboratorio. Pierden movilidad y, al cabo de pocas semanas, mueren.

8.° El organismo se reproduce de una manera muy singular. Todas las células se dividen sincrónicamente en dos. Luego, poco a poco, el organismo se retuerce en hélice y una especie de monda de naranja, con la mitad de las células recién nacidas, se separa y se cierra en un nuevo organismo.

9.° El organismo parece tener algunas ventajas sobre las bacterias individuales similares. Por ejemplo, no se deja atrapar por las fuerzas de la tensión superficial y soporta altísimas concentraciones de sal en su entorno (han aparecido ejemplares en aguas el doble de saladas que el agua de mar).

Creo que este ser vivo, que todavía no tiene nombre, posee una gran trascendencia. Para casi todo el mundo es una curiosa colonia de bacterias. Nadie osaría llamar individuo a este ser. En biología se llama individuo a un ente más claramente individual. Estamos atrapados por el valor y el significado de las palabras. Pero es justamente un caso que reclama ensanchar el significado de una palabra. Es cuando se reclama una nueva definición. Es cuando una palabra puede pasar de ser sólo una palabra del lenguaje común a ser un concepto científico. Algo parecido ocurrió en su día con conceptos como energía, fuerza, información... y algo parecido ocurrirá en pocas páginas con una pala-

bra y un concepto tan polémico en temas de evolución como el de «progreso».

Volvamos a nuestra sorprendente bola de bacterias magnetotácticas. Está claro que la palabra individuo, tal como se usa hoy en biología, es demasiado fuerte. La intuición nos dice que este organismo (insisto en que me permito usar el término para darme ánimos) es menos individuo que una hormiga, pero claramente más individuo que un hormiguero. Esto nos lleva a una duda interesante. La pelota de bacterias de Río se ha encontrado en otros lugares y acentúa la sospecha de que no estaría de más aceptar que el concepto de individuo admite grados. A lo mejor lo que es demasiado fuerte es forzar la idea de que el concepto individuo sólo tiene dos estados posibles: ser un individuo o no serlo. Ésta es la cuestión. Y no se trata, creo, de una cuestión para Hamlet.

Si llegamos, como hemos llegado, a la conclusión de que los casos intermedios tienen interés, entonces es mejor cambiar la definición de individuo. Podemos admitir por ejemplo el individuo cero (no es un individuo) y el individuo uno (máximo grado de individualidad) como extremos de toda una secuencia ordenada de casos reales intermedios. Se trata de una idea similar, matemáticamente, a la de la probabilidad como medida de la verosimilitud de un suceso. La probabilidad de cualquier suceso real está normalizada entre dos extremos, el valor casi cero para los sucesos imposibles (esta gata parirá una gaviota) y el valor casi uno para los sucesos ciertos (mañana la Tierra dará otra vuelta sobre sí misma).

Nos disponemos a proponer una definición de individuo a modo de toda una escala de individualidades. Lo haremos por inspiración de un caso concreto, la pelota del Lins y su equipo. Su universalidad se evaluará con la aplicación a otros casos. Con ello se satisfará o no nuestra intuición y el concepto merecerá o no la entrada en nuestro esquema conceptual.

En primer lugar hay que decir que todos los seres pluricelulares conocidos están compuestos por células eucariotas, es decir, células mucho más grandes y complejas, células con orgánulos diferenciados como núcleos, mitocondrias, etcétera. Es el caso de todos los animales, todas las plantas, todos los hongos... Durante miles de millones de años de vida en el planeta sólo hubo células procariotas, bacterias...

Y los primeros seres pluricelulares datan de hace tan sólo unos cientos de millones de años. Preguntar es gratis: ¿no estaremos ante la reliquia de un intento de construir un individuo pluricelular con células procariotas? Si es así, el experimento no llegó muy lejos, quizá todo lo que se podía llegar en mil millones de años con células tan simples, pero por lo menos el ensayo tuvo lugar.

Asumimos ahora el intento de definición del concepto de individuo como una escala entre cero y uno. Es bien probable que el primer individuo pluricelular no fuese directamente un individuo-uno, un *top one* y, como hemos comentado, hoy podemos contemplar individuos de varios niveles intermedios. En un tiempo se discutió (se puso de moda, luego se olvidó y creo que ahora está renaciendo) la idea de una colonia de insectos sociales concebida como una especie de superorganismo. La propuesta que sigue pretende dar un nuevo aliento a ésta y muchas otras polémicas parecidas. En efecto, los límites no son nítidos y estamos dispuestos a aceptar grados incluso para la idea de individualidad. Pensemos también en un grado máximo y en otro mínimo. Existen objetos hechos de materia viva que nunca han sido ni serán individuos. Antes hemos citado el ejemplo de un órgano como el hígado. Nunca se ha visto un hígado paseándose a su aire por el mundo. Un órgano así tiene pocas opciones para independizarse y convertirse en un organismo. Asignemos el número cero (0) a este mínimo. En el otro extremo existen objetos vivos como, por ejemplo, los coordinados por un cerebro integrador. Asignemos el número uno (1) a esa máxima individualidad. Necesitamos un principio de definición. Probemos la siguiente:

Un individuo vivo es un objeto que tiende a mantener una identidad independiente de la incertidumbre de su entorno.

La definición es toda una invitación a explorar aquellas propiedades que favorecen su individualidad. He aquí una propuesta de lo que bien podríamos llamar la escala de la individualidad. La nota final depende de nueve criterios:

1. El individuo es un Todo compacto con una superficie frontera abierta al paso de materia, energía e información. La compacidad tiene grados: en un organismo es mayor que en una población.

2. El individuo es un Todo independiente de Partes interdependientes. Hay grados: los pólipos de una colonia de coral son más interdependientes que las bacterias de un simple agregado.

3. El individuo es un Todo con una viabilidad prioritaria a la de cualquiera de sus Partes. Hay grados: el termitero es más viable que una termita y una termita más que su población intestinal de microorganismos.

4. El individuo es un Todo al servicio del cual están las funciones de sus Partes. Hay grados: el sistema inmunitario es más exclusivo que un ejército regular.

5. El individuo es un Todo (genéticamente) uniforme. Hay grados: lo es más una colonia de insectos sociales que una de insectos no sociales.

6. El individuo es el resultado de algún (tipo de) desarrollo. Hay grados: lo es más una colonia de coral que procede de la división asexual de un único pólipo que una colonia de pingüinos.

7. El individuo es una unidad selectiva y/o evolutiva. Lo primero significa que algún tipo de selección actúa directamente sobre la unidad, lo segundo significa que la unidad supera algún tipo de selección. Una cosa es quién se presenta al examen y otra quién lo supera. A veces se presenta un organismo (altruista), pero lo que sobrevive es un gen (egoísta). Hay grados: la selección natural puede presionar más sobre un organismo que sobre una familia o una manada de organismos.

8. El individuo contiene una parte especial dedicada a coordinar el todo con cada una del resto de las partes. Es el núcleo de un átomo, el de una célula, el cerebro de un animal o el ayuntamiento de una ciudad. Hay grados: un cerebro centraliza más en un organismo que un ayuntamiento en una ciudad.

9. El individuo es una unidad capaz de repetirse, de crear otro individuo similar a él mismo. Hay grados en la calidad y la cantidad. El grado de similitud es máximo entre los individuos de una misma cepa bacteriana (clónicos), es algo menor en el alto parentesco que existe entre la reina de una colonia y cualquiera de sus obreras, y menor aún entre un hormiguero y otro nuevo creado por una nueva reina.

Con estos criterios quizá se pueda proponer una distinción entre *individualidad* e *individuo*. Las fronteras no son nunca nítidas, pero po-

dríamos llamar individuo a la gama alta de las individualidades. La individualidad se hace individuo a partir de cierta nota en este examen de nueve puntos. Las individualidades vivas son individuos...

La única propiedad no comprobada en el caso del organismo de Río es la quinta. No hay técnica disponible hoy en día para un análisis estadístico de esta índole. La octava propiedad no se viola del todo. La esfera de bacterias tiene una cavidad común en el centro de la esfera por donde parece que se difunden las señales químicas que coordinan muchas de las actividades del organismo. Piénsese, por ejemplo, en el caos en el que se convertiría el movimiento de una galera romana si el personaje que marca el ritmo con un instrumento de percusión abandonara su puesto. El organismo de Río tendría los mismos problemas de movilidad si sus bacterias no se coordinaran de alguna manera. No parece, por lo tanto, que nuestro organismo vaya a sacar mala nota en su examen de individualidad.

Volvamos ahora al eje de la discusión. En una realidad dada, la definición de un individuo concreto define a su vez cierto nivel de observación. Avanzamos. Porque no todos los niveles de observación pueden presumir de individuo relevante. Y para cada nivel, una realidad tiene un conjunto de leyes y contingencia que regula todo lo que en ella pueda llegar a acontecer. Es lo que hemos llamado la Constitución. En una realidad habrá entonces tantas constituciones como niveles relevantes se puedan distinguir. Es el momento de recurrir de nuevo a la metáfora de un paisaje de caminos marcados a su vez con eventuales señales de prohibido el paso en sus bifurcaciones.

Insistamos: ciertos objetos están más cerca de la individualidad que otros. Y algunos lo están tanto que introducen una partición de la realidad en distintos niveles relevantes de observación. Cada uno de estos niveles funciona con su propia Constitución, es decir, como una realidad con sus propias leyes y su propia contingencia. Cada Constitución se puede visualizar entonces como el mapa de una maraña de caminos posibles marcados con unas señales que regulan el dominio de lo imposible. Este mapa metafórico es un plano de la estructura de la Constitución de la realidad. ¿Cómo llamar a esta estructura? Su aspecto es el de los afluentes que vierten el agua al río desde cualquier punto del paisaje a través de hilos de corriente, riachuelos, afluentes, etcétera (en este caso, las señales de prohibido el paso prohíben re-

montar las pendientes y que el mar riegue las montañas). También se parece al sistema vascular que lleva la sangre oxigenada a todos los puntos del interior de un cuerpo a través de arterias, vasos, capilares, etcétera (el sentido tampoco es aquí arbitrario). Y se parece también a la red viaria que nos lleva, por ejemplo, de un punto concreto de la ciudad de Barcelona a otro punto concreto de un pueblo de los Alpes suizos, a través de callejuelas, calles, autopistas, carreteras, caminos, etcétera (donde hay más de una ruta posible y donde no toda ruta lo es...). También se parece a un sistema nervioso. Y en él nos inspiramos para bautizar el mapa de las rutas posibles o, si se quiere, el mapa de las alternativas de aquello que puede ocurrir en la realidad.

La nervura de lo real

Tomo prestada la expresión del título *A nervura do real, imanência e libertade em Espinosa*, obra de la filósofa brasileña Marilena Chaui [14]. Me apresuro a decir que sólo tomo la expresión por su adecuación a nuestro concepto. Nada de lo que precede ni de lo que sigue debe achacarse a la feliz expresión de la profesora Chaui. De forma curiosa, en nuestro idioma, la palabra «nervura» existe sólo en el lenguaje de los libreros:

> «**nervura**. f. Conjunto de las partes salientes que en el lomo de un libro forman los nervios o cuerdas que sirven para encuadernar».

Tal como se encuadernan hoy los libros, no creo que esta bella palabra vaya a tener mucho uso en el futuro. Así que, con el debido respeto, propongo a la Real Academia Española una extensión de su significado:

> «**nervura**. f. Estructura ramificada, real o abstracta, que recuerda la de los nervios en el sistema nervioso».

Admitimos, pues, dos nuevos conceptos en nuestro esquema conceptual, el de *individuo* y el de *nervura de lo real*. Ambos entran como socios de mérito de la mano del viejo concepto de selección. La señal

de «dirección obligatoria» no permite selecciones. La señal de «prohibido el paso» las requiere. Veamos el ejemplo más sencillo posible.

Para un péndulo simple, el camino es único. La única fuerza exterior que actúa sobre la lenteja del péndulo es la de la gravedad. Sólo existe una posición de equilibrio y además es estable. La nervura de su realidad no puede ser más simple. No hay una sola bifurcación. Para un péndulo caótico construido con cuatro imanes, en cambio, hay varias fuerzas que compiten en el espacio, una gravitatoria y cuatro magnéticas. En cada punto del espacio se suman las cuatro creando un campo de fuerzas con varios puntos de equilibrio, allí donde la suma de fuerzas se anula. No todos son equilibrios estables. La nervura de esta realidad se ha hecho bastante más interesante. Hay varias bifurcaciones de caminos donde tomar decisiones. ¿Quién las toma? Las fluctuaciones. En el péndulo simple, las fluctuaciones de cualquier cosa (de temperatura, de humedad, de la precisión de las condiciones iniciales, etcétera) están condenadas al más estricto anonimato. Un sistema en torno de una situación de equilibrio estable se olvida literalmente de cualquier fluctuación. Por ello el péndulo simple no distingue su futuro de su pasado. Es el tedio de la predicción tan perfecta como se desee. El péndulo simple está obligado a un único movimiento posible fijado por las leyes de Newton. El péndulo caótico tiene infinitas evoluciones posibles compatibles con la nervura de su realidad, es decir, con las restricciones que imponen los cuatro imanes y la gravedad. Por más que uno se esmere en repetir las mismas condiciones iniciales en experimentos sucesivos, las trayectorias acabarán por separarse. El péndulo caótico es ultrasensible a sus condiciones iniciales y en cada nueva prueba describirá un movimiento nuevo totalmente imprevisible en la práctica. La trayectoria del péndulo caótico depende de toda una colección de *selecciones* sucesivas. De las muchas rutas que podrían ocurrir, sólo una ocurre en (la) realidad. La nervura de esta realidad no es una ramificación de una sola rama sino de varias.

Demos ahora un salto para considerar otro objeto con claros indicios de cumplir con la condición de individuo: el organismo vivo, un pájaro. Las restricciones de la Constitución de esta realidad vetarán muchas posibilidades de existir, pero dejarán un enorme dominio de opciones. La nervura de la realidad no es de unas pocas ramas, sino de una frondosidad considerable. La relevancia del concepto de selección

crece. En efecto, el futuro del organismo y quizás el de sus descendientes depende en gran medida de este concepto. Otro salto más y nos encontramos frente al espejo.

El organismo que se reconoce en el espejo se enorgullece de un órgano especial, el cerebro. Sabe hacer algo muy raro en la naturaleza: anticiparse a la incertidumbre que le toca en suerte. Es la inteligencia. He aquí uno de los logros más notables de la materia: anticipar la incertidumbre. ¿Se puede pensar en una ayuda mejor para el momento exacto en el que hay que ejercer la selección? Estamos ante la nervura de la realidad propia de la creatividad humana, una prestación de la materia cuyos límites se nos escapan. Es el objeto que hemos elegido para nombrar el concepto.

Estamos preparados para las preguntas siguientes. ¿Cómo se accede a una realidad? ¿Cómo se permanece en ella? Aquí puede ayudar otra metáfora. Supongamos que tomamos una *fotografía* de una realidad. Esto equivale a consultar el catálogo de todos los objetos del mundo en un instante concreto. Lo que observaremos en él son los objetos de algún modo seleccionados para acceder a la realidad, pero sobre todo los seleccionados para permanecer en ella durante un mínimo intervalo de tiempo. De otro modo la probabilidad de salir en la foto sería muy pequeña.

4
Selección fundamental, selección natural y selección cultural
o la cuestión de empezar a existir y la de seguir existiendo

Sea una realidad. Su Constitución establece el paisaje de lo posible. Es un mapa de lo permitido por las restricciones. ¿Y ahora? Dentro de la libertad que aún queda, ¿qué es lo que realmente ocurre? En el mapa de la nervura de esta realidad hay más de una ruta posible. Una de ellas tendrá lugar. Y si ocurre una de varias posibles, es que hay selección.

Podemos hablar así: todo lo que existe es el resultado de una selección. En particular, cuando ocurre algo necesariamente es que sólo hay una opción y la selección es única. ¿Qué más se puede decir de la selección que abre el paso a un objeto o a un fenómeno para que acceda o permanezca en la realidad?

En principio, podemos apelar a la verosimilitud de la emergencia y permanencia de un objeto según sea tal objeto y la realidad preexistente en la que éste aterriza. El nacimiento de una nueva ballena depende de la población de ballenas preexistentes, y su permanencia, del alimento disponible. La aparición de una nueva molécula de cloruro sódico depende del estado de los compuestos que pueden intervenir en la reacción que provea esta molécula como producto; su permanencia depende de las condiciones para que esta molécula intervenga como reactante en otra reacción... Y lo mismo se puede decir de una galaxia, de un huracán, o de una nueva religión. Sólo se puede permanecer si primero se emerge, pero no por eso es menos importante la capacidad de permanecer que la de emerger. Los objetos presentes en la realidad lo están porque son capaces de permanecer en ella, es decir, porque dada una Constitución de su realidad preexistente, resulta que tienen una probabilidad razonable de continuar siendo compatibles con las restricciones que aquélla impone.

En otras palabras, de lo que accede a la realidad se (re)selecciona continuamente aquello que puede permanecer. La obviedad de esta

cuestión es casi insultante y se ilustra bien con la metáfora propuesta antes: la probabilidad de salir en la foto de la realidad depende de su capacidad de permanecer en ella.

El concepto «perseverar» se hace crucial para comprender la realidad y, como vamos a ver ahora mismo, permanecer o perseverar es una idea que adopta diferentes significados (por lo menos tres) en la materia. Empecemos por la realidad más fundamental, la de las partículas elementales, los «ladrillos» de la materia y las realidades de los niveles inmediatamente superiores, los átomos y las moléculas. En estos casos la capacidad para *perseverar* equivale a la *estabilidad.*

Algunas partículas, como los llamados hadrones, son muy estables. No ocurre lo mismo con muchas otras. Las partículas se crean y se extinguen según las reglas de las fuerzas que rigen a este nivel, las fuerzas electromagnéticas. La verdad es que en la realidad de la superficie de la Tierra (con su gravedad, temperatura, presión atmosférica, etcétera) hay pocas partículas que puedan ir paseando por ahí sin sufrir cambios dramáticos. En tales condiciones son estables los protones y electrones (tienen masa) y los fotones y gravitones (no tienen masa). En un experimento concreto en el que intervenían mil millones de cuatrillones de protones y electrones (un uno seguido de treinta y tres ceros) y que duró diez millones de segundos no se observó ningún cambio en estas partículas [15]. La edad del universo no llega a veinte mil millones de años (las últimas estimaciones, cada vez más precisas, dan unos trece mil quinientos). Se piensa que en ese tiempo sólo se han desintegrado unos diez trillones de protones. La formidable estabilidad del protón equivale a una ley fundamental de la naturaleza: la conservación del número bariónico. Si la realidad del universo es tal como hoy la observamos es gracias a la tremenda energía que se necesita para la desintegración de los protones. Esta estabilidad garantiza su frecuencia (abundancia) en el mundo real.

Nuestra discusión podría extenderse con el examen de la estabilidad y de las correspondientes abundancias de átomos y moléculas en distintas realidades (en el universo, en la superficie de la Tierra, en su interior, etcétera). En cada nivel de la realidad intervienen distintas leyes fundamentales y distintas probabilidades de interacción (de reacción con otros átomos). Son las nervuras de distintas realidades. Los núcleos atómicos, formados por protones y neutrones, se rigen por un

paquete de leyes fundamentales que corresponden a las llamadas *interacciones fuertes*. Los núcleos captan otras partículas cargadas, los electrones, y el resultado se rige por las leyes de las *fuerzas electromagnéticas*.

Los átomos, por ejemplo, no son equiprobables en el cosmos. Su abundancia no está igualmente distribuida. El hidrógeno (número atómico Z = 1) es con mucho el más abundante, con 920.461 átomos por millón; le sigue el helio (Z = 2), con una abundancia relativa de 78.344; luego, a mucha distancia, el oxígeno (Z = 8), con 608; el carbono (Z = 6), con 305 y el nitrógeno (Z = 7), con 84. El uranio (Z = 92) tiene una abundancia relativa de dos millonésimas de átomo por millón y los átomos con números atómicos de más de 110 son tan inestables que ni siquiera se han descubierto todavía. ¡Por eso no salen en la foto! La materia cósmica contiene probablemente todos los átomos estables y algunos de los casi estables. La abundancia de esos objetos llamados átomos no es la misma en el universo, en la superficie de la Tierra o en un pedazo de materia viva. Pero lo que se observa en cada una de esas realidades depende de su capacidad de emergencia y de permanencia, es decir, en un sentido amplio, de su estabilidad.

El 90% de la materia del universo está concentrada en las estrellas, en cuyo interior se alcanzan temperaturas de cientos de millones de grados. En esa realidad, las fuerzas nucleares contribuyen mucho más a su Constitución que cualquier otra. Las moléculas habitan una realidad mucho más fría, gobernada por las fuerzas electromagnéticas. La reina de los compuestos químicos a baja temperatura procede de la reacción de dos abundantísimos elementos, el oxígeno y el hidrógeno, sobre todo uno de ellos: el agua. No hay duda de que este detalle prepara la realidad para la emergencia de otros objetos: los individuos vivos. Tampoco escasea el amoniaco, el ácido sulfhídrico y el metano, que son compuestos de elementos frecuentes con el omnipresente hidrógeno. Son moléculas volátiles, quizá no muy estables pero sí muy activas para intervenir en un gran surtido de reacciones químicas. Otras son más estables y no volátiles, como los óxidos de silicio, hierro, aluminio y magnesio. En este nivel mandan las reglas de las combinaciones químicas (el metano casi no se disuelve en agua, el amoniaco sí...). Una realidad molecular particular puede contener todos o varios de los noventa elementos químicos, lo que puede dar lugar a un

número mareante de moléculas diferentes, que dibujan un intrincado paisaje de eventuales reacciones mutuas. La probabilidad de una reacción química no depende sólo de las propiedades químicas de los posibles reactantes (electronegatividad, etcétera) sino de su probabilidad de encuentro, es decir de sus abundancias relativas y de sus estabilidades previas.

En suma, en los primeros niveles de la realidad, los objetos que existen (partículas, átomos y moléculas, cristales, rocas... estrellas), existen porque emergen con facilidad —por combinación de lo que ya está ahí— y porque su permanencia es compatible con la realidad a la que han accedido. Directa o indirectamente, en su versión fuerte o en su versión no tan fuerte, la clave es la *estabilidad*. Ya tenemos un *criterio* de selección para esta primera gran familia de realidades que llamaremos «materia inerte». La permanencia de un objeto tiene que ver con la incertidumbre de su entorno. Cuando la selección *bendice* un objeto, lo hace en virtud de su estabilidad frente a la incertidumbre que permiten las leyes fundamentales vigentes. Llamemos solemnemente «selección fundamental» a este tipo de selección. Hablando de otro modo: todo objeto o suceso, o propiedad de objeto o suceso, que supera una selección fundamental adquiere una plusvalía relacionada con su estabilidad. Sintetizamos lo anterior en la forma siguiente:

Lo inerte resiste *la incertidumbre de su entorno para estar en su realidad. Esta capacidad es la* estabilidad *y se adquiere por* selección fundamental. *La resistencia es la primera forma de rebelión contra la incertidumbre, la estrategia más fundamental para* seguir estando.

¿Se pueden hacer apuestas sobre las decisiones de la selección fundamental? La palabra azar se inventa a veces para tener un sujeto de selección. ¿Quién o qué selecciona entre lo más o menos probable? Decide el azar. Pero el azar no selecciona de manera homogénea entre las alternativas disponibles. El azar selecciona según sea la probabilidad de cada alternativa. Para describir estas situaciones, justamente, se construye la teoría matemática de la probabilidad [16]. Hacer apuestas sobre la selección más probable admite tratamiento matemático y equivale a maximizar una función relacionada con el concepto de probabilidad (como la entropía de Shannon en la teoría matemática de la infor-

mación o la entropía de Boltzman en mecánica estadística) o el concepto mismo de probabilidad, bajo el paquete de condiciones (restricciones, ligaduras) conocidas del sistema. Por este procedimiento se pueden determinar los estados más probables de un sistema termodinámico, en el estado de equilibrio o fuera de él, y las estructuras más estables en sistemas mucho más generales. Se trata quizá de una primera aproximación a una teoría de la complejidad. Digamos que es una aproximación a las complejidades más simples. De este modo se pueden deducir (predecir, comprender, explicar) propiedades muy parecidas entre sí, pero que se dan en objetos bien distintos.

Un caso muy general es la distribución de una población de objetos (peces de un banco, palabras de un idioma, notas musicales...) en función de una medida de su tamaño (peso, número de fonemas, duración...). Hemos insistido en la idea de que la inteligibilidad es lo común entre lo diverso. ¿Se puede pedir más inteligibilidad que la de la distribución potencial? A esta misma ley responden la distribución de los peces de un banco según sea su tamaño, la frecuencia de una palabra en un idioma según sea su longitud medida en fonemas [17], la conectividad de las intrincadas redes de transmisión de energía que pueden aparecer en un ecosistema o el estudio de cuestiones aparentemente tan difíciles como el comportamiento críptico o aposemático de un animal respecto de su entorno [18]. Cuanto más pequeño es un animal o más corta es una palabra, mayor será su probabilidad de presencia en la realidad [19], [20], [21] y [22]. Es decir, objetos inertes, aspectos simples de objetos vivos o incluso aspectos simples de objetos cultos, comparten propiedades seleccionadas por su presunta estabilidad. Reflexiones como ésta hacen pensar en la posibilidad de una teoría general de la complejidad, un sueño teórico que no comparten todos los naturalistas.

Los objetos inertes resisten la incertidumbre por el procedimiento de no resistirse, es decir, por el procedimiento de seguir mansamente sus fluctuaciones. La única rebelión posible, para un objeto inerte, es ser estable, ampliamente estable. Pero hay maneras más sofisticadas de permanecer en la realidad. Ciertos objetos son algo más que objetos inertes. Existe un tipo de selección más fina que la selección fundamental. Ha llegado el momento de decirlo. En la historia del universo ha habido tres sucesos que destacan sobre los demás:

Primera efeméride, el principio de la historia de la materia. El Big-Bang da el pistoletazo de salida a la evolución de la realidad. Es la materia inerte. Ocurrió hace unos trece mil quinientos millones de años.

Segunda efeméride, la emergencia del primer ser vivo. Quizá fuera una célula procariota no muy distinta de una bacteria. Es la materia viva. La evidencia más antigua es de hace unos tres mil ochocientos millones de años.

Tercera efeméride, la emergencia de la inteligencia abstracta. Debió de ser algo muy parecido a un ser humano. Es la materia culta. Y está presente desde hace sólo unos cien mil años.

Son tres grandes efemérides porque, como se puede intuir y como vamos a comentar, dividen la historia de la realidad en tres partes fundamentales caracterizadas por tres tipos de selección diferentes, tres maneras distintas de aparecer y de permanecer. No renunciamos a aventurar definiciones de vida e inteligencia con palabras y términos propios del esquema conceptual que aquí vamos construyendo. Pero, llegado este punto, no me resisto a adelantar lo que sigue:

En el mundo inerte permanecer significa seguir estando (la estabilidad); en el mundo vivo permanecer significa seguir vivo (la adaptabilidad) y en el mundo culto permanecer significa seguir conociendo (la creatividad).

Pero antes de entrar en estas cuestiones necesitamos nutrir un poco nuestra intuición. Con tal fin propongo un paseo de pocos párrafos por la materia.

Materia inerte

En el fondo de un ser vivo, en el fondo de sus células, en el fondo de sus moléculas, en el fondo de sus átomos, están las partículas elementales. Allí, en el fondo más hondo conocido, encontramos la Constitución de la realidad más fundamental. Porque, lo hemos comentado más arriba, cuatro son las fuerzas fundamentales que regulan este mundo: las fuertes, las electromagnéticas, las débiles y las gravitatorias. Afinemos ahora un poco más. Algo se puede decir de estas partículas

últimas que constituyen la materia. Por un lado, deben tener cierta estabilidad, ya que la edad de la materia es del orden de la edad del universo (unos cien mil billones de segundos). Por otro lado deben ser partículas cargadas eléctrica o magnéticamente, ya que han de tener cierta relevancia química (capacidad para combinarse con otras). No hay muchas partículas que cumplan estos dos requisitos. Sólo el nucleón (conjunto de protón y neutrón), el electrón y el fotón pueden servir como «ladrillos» de la materia viva. Los nucleones se unen para formar núcleos atómicos, los núcleos atómicos con los electrones forman átomos, los átomos se juntan para formar moléculas, y las moléculas forman complejos que pueden considerarse seres vivos.

Sin embargo, el comportamiento de los individuos vivos difícilmente será inteligible en términos de una realidad gobernada por fuerzas electromagnéticas. Para empezar, el medio interior y exterior de la vida es sobre todo agua. Y en el agua es donde los objetos vivos intercambian materia, energía e información con el entorno donde, por cierto, viven todos los demás objetos vivos. Un ser vivo obtiene su energía de la que está almacenada en los enlaces moleculares. El escenario mínimo de un individuo vivo es del tamaño de una célula. La química será relevante a la hora de comprender su metabolismo, pero lo será mucho menos en otro piso de la jerarquía. La comprensión del comportamiento de una manada de ñúes emigrando en busca de nuevos pastos no parece reducible a la energía libre que se pone en juego durante el metabolismo de su enorme variedad de células. Tampoco es posible conectar la emergencia de hexágonos en los ojos facetados de los insectos con las interacciones fuertes en el interior de los núcleos de los átomos de las moléculas de sus células y humores. Cada nivel jerárquico de la organización viva tiene su propia Constitución, y los objetos y eventos posibles su particular nervura ante sí. En cualquiera de sus posibles realidades, la vida tiene sus peculiares restricciones.

Materia viva

Buena parte de la biología moderna está ocupada aún en descubrir las leyes fundamentales que rigen en los diferentes niveles relevantes para la vida (células, organismos, familias, manadas, sociedades, na-

ciones...). Muchos físicos, biólogos y matemáticos persiguen esas leyes con ahínco [23]. Se trata quizá del gran reto intelectual de pensamiento científico moderno. ¿Existe algo que pueda llamarse una teoría de la complejidad? Disciplinas como la termodinámica del no equilibrio o la teoría del caos han creído aproximarse alguna vez. Hablaremos de ello en breve, pero de momento la pregunta es:

¿Cuándo puede asegurarse que la selección favorece a un individuo vivo?

La materia viva está hecha de materia inerte, pero está claro que la idea de permanecer no significa lo mismo en la materia inerte que en la materia viva. Permanecer significa más que seguir estando. Permanecer significa ahora seguir *vivo*. Las leyes fundamentales de la naturaleza están tan lejos en las profundidades de la estructura de la materia viva, que ya no podemos apelar a la selección fundamental. La selección trabaja ahora entre la incertidumbre liberada por otros tipos de reglas, conocidas o no (más bien no), que operan en otros niveles más densos, más grandes y, sobre todo, más complejos. La selección trabaja ahora en un entorno en el que la interacción con otros seres vivos es necesaria e intrincada (relaciones depredador-presa, sexuales, simbióticas, parasitarias, de competencia, etcétera). Con tantas variables, la incertidumbre del entorno también adquiere una tremenda riqueza de alternativas posibles.

¿Qué tipo de selección favorece que una aleta se convierta en pata (porque además de nadar resulta que camina) o que una pata se convierta en ala (porque además de caminar resulta que vuela) o que una pata vuelva atrás y se reconvierta en una aleta? ¿Qué tipo de selección hace que los alcornoques mediterráneos, o casi todos los árboles de la sabana brasileña se hayan adaptado a los incendios?

Lo que en el mundo inerte es seguir estando, en el mundo vivo es seguir vivo. La selección favorece ahora aquello que ayuda a seguir viviendo. La afirmación tiene algo de circular, porque la tendencia a seguir vivo de alguna manera se esconde en la misma definición de ser vivo. El círculo no se cierra del todo, ya que hay individuos que mueren sin dejar descendencia y especies que se extinguen o que se transforman en otra especie. Me arriesgo a decir que, según la terminología

de la *Crítica de la razón pura* de Kant, se trataría más de un juicio sintético que de un juicio analítico. El predicado no está contenido en el sujeto. Además, la afirmación sería un juicio a priori, porque aunque la idea se base o se inspire en la experiencia, no depende directamente de ella. Volveremos sobre este punto. ¿Se le puede pedir menos a algo tan notable como la *selección natural?* Porque de eso y no de otra cosa hemos estado hablando. Se trata sin duda de una de las ideas más potentes y bellas de la historia de la ciencia. La idea de Darwin queda así invitada e incluida en nuestro esquema conceptual. Selección fundamental antes del primer ser vivo, selección natural en la vida. Su fuerza también reside en su casi evidencia.

Lo hace notar Javier Sampedro en su obra *Deconstruyendo a Darwin:* muchos biólogos de la época de Darwin debieron de hacerse esta íntima reflexión: «¡Pero qué sencillo y potente!, ¿cómo no se me ha ocurrido a mí semejante diana?». La idea de Darwin aterriza sin embargo muy suavemente en nuestro esquema conceptual. Seguir vivo es más que seguir estando. El ser vivo, para seguir vivo, no sólo resiste la incertidumbre (es compatible con los caprichos de la incertidumbre), hace algo más: la *modifica.* Por ejemplo, si la temperatura del entorno sufre fluctuaciones demasiado amplias (sube demasiado o baja demasiado), el ser vivo no sólo resiste (como haría una piedra), es decir, no sólo mantiene su identidad aunque sufra grandes variaciones térmicas. También es capaz de una o dos cosas más: mantener su propia temperatura o controlar las desviaciones amenazadoras de las temperaturas externas. Para ello intercambia información con el entorno, detecta las fluctuaciones de riesgo, las interpreta y reacciona para anticiparse al drama. Eso es más que resistir, eso es capacidad para modificar. A partir de aquí es cuando se puede hablar de autoorganización sin cometer abusos de lenguaje. La relación entre sistema y entorno tiene diferentes alternativas. Trataremos de ello en el séptimo capítulo, pero adelantemos que una alternativa es la movilidad (cambiar de entorno) y otra la tecnología (cambiar el entorno). El argumento darwiniano escapa de la circularidad. Los argumentos no se cierran del todo. Precesionan. La selección natural actúa probablemente sobre objetos que hemos llamado individualidades, y ello ocurre en varios de los niveles de la realidad viva, desde los genes, como le gusta insistir (para muchos quizá demasiado) a Dawkins [25], hasta el organismo o las poblaciones de

organismos. Una de las discusiones clásicas y todavía frescas en temas de evolución se centra justamente en esta cuestión (el hormiguero es más decisivo respecto de la hormiga obrera que la manada de ñúes respecto de cualquiera de sus miembros). Volveremos sobre esta cuestión en el capítulo cuarto. De ahí procede la idea de la individualidad como unidad evolutiva. El mundo vivo, los individuos, además de resistir la incertidumbre, la modifican. La selección natural opera entonces a favor de la idea de que alguna clase de individualidad (gen, organismo, población...) siga viva. En el resultado final aparecen dos conceptos nuevos que añadir a la estabilidad: la «adaptabilidad» y la capacidad de «evolucionar». Acumulemos fuerza para resumir:

Lo vivo, además de resistir la incertidumbre, la modifica. Esta capacidad se adquiere por selección natural *y hace posible la adaptabilidad y la capacidad para evolucionar. Es la segunda forma de rebelión contra la incertidumbre, la estrategia más natural para* seguir viviendo.

La pregunta ahora es: ¿se pueden hacer más apuestas sobre la selección natural? Autores como Brian Goodwin [23] o Stuart Kauffman [26] creen que se ha exagerado su papel y que la emergencia de formas físico-químico-matemáticas puede soslayar en muchos casos la necesidad de hablar de selección natural. En la historia reciente de la biología se ha acumulado un verdadero tesoro de casos concretos [27] donde podemos zambullirnos en busca de inteligibilidad. Por ejemplo, la idea antes apuntada de maximizar funciones del tipo de la entropía de Shannon para comprender la estabilidad de lo que podríamos llamar «complejidades simples» del mundo inerte (o de aspectos inertes del mundo vivo) funciona también para comprender la adaptabilidad de estructuras complejísimas del mundo vivo. Es el caso de la intrincada red de relaciones en un hábitat marino (figura 4.1) [28] y [29].

Dedicaremos a esta cuestión un capítulo entero. De momento sigamos con la escalada contra la incertidumbre. Los objetos vivos la modifican para seguir vivos. Sin embargo, hay maneras aún más sofisticadas de seguir viviendo. No todos los objetos vivos son sólo vivos. Algunos, no muchos, están dotados de inteligencia abstracta. Existe un tipo de selección más potente y sobre todo más rápida que la selección natural.

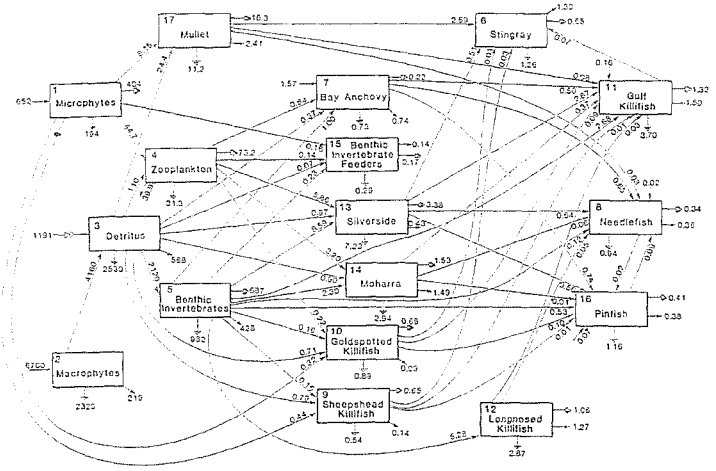


Figura 4.1. Complejidad: una red de interacciones de energía en un estuario (Robert E. Ulanowicz, *Ecology. The Ascendent Perspective*, Columbia University Press, 1997).

Por primera vez está claro quién es el sujeto seleccionador. No es el azar. Es la mente humana.

Materia culta

Nuestra intuición necesita tomar impulso y darse otro paseo por la materia. La cantidad de materia inerte del universo se estima en dos billones y medio de trillones de cuatrillones de kilos ($2{,}5 \times 10^{54}$ kg), de ellos (que sepamos) sólo unos mil ochocientos billones de kilos ($1{,}8 \times 10^{15}$ kg) forman parte de los individuos vivos, de los cuales estamos seguros de que sólo tres décimas de billones de kilos (3×10^{11} kg) pertenecen a individuos dotados de inteligencia abstracta. Ha llegado el momento de hablar de algo más que de simple masa. La complejidad no se mide en kilos. A estas alturas de la discusión, pensar la complejidad es ya inevitable. Vayan por delante algunas intuiciones y algunos números sobre ello.

Un gramo de bacterias es más complejo que un gramo de sal común. La complejidad se puede medir por el número de estados diferentes accesibles a cada uno de estos pedacitos de materia o, si se quiere, por la cantidad de información que se necesita para construir un todo a partir de sus partes (medido por ejemplo en bits, el número de decisiones binarias necesario). Un cristal de cloruro sódico tiene pocos estados accesibles diferentes. Se puede calcular el número de alternativas a partir de la combinatoria de sus configuraciones microscópicas (basadas en los átomos de cloro y de sodio) junto con la energía libre disponible para los distintos procesos de transformación. Para hacer el mismo cálculo en un pedazo de materia viva hay que tener en cuenta, además, todas las alternativas acumuladas durante su historia en la información genética. Para dar una idea, un virus (una estructura relativamente simple en la frontera que separa los vivos de los no vivos) tiene la friolera e impronunciable cifra de un uno seguido de 36.000 ceros de estados diferentes; esto es, para construirlo a partir de sus componentes más sencillos se necesita un manual de instrucciones de 120.000 bits. Una bacteria equivale a un uno seguido de un millón trescientos mil ceros, es decir, un manual de 6.000.000 de bits. Y un ser humano tiene un uno seguido de setenta y dos millones de ceros de estados diferentes, lo que equivale a un manual de 240 millones de bits. Para tener una idea de lo que significa esta locura de número, $10^{72\,000.000}$, recordemos que en el universo sólo hay 10^{80} de átomos o que *tan sólo* se pueden jugar 10^{120} partidas de ajedrez distintas.

No es fácil concebir un objeto más complejo que el cerebro. Pesa unos mil cuatrocientos gramos y es el héroe de la tercera rebelión. Es la inteligencia abstracta y responsable central de la *materia culta*. Si la materia inerte resiste la incertidumbre y la materia viva la modifica, ahora se puede decir que la materia culta ¡la anticipa! Anticipar significa aquí atender expresamente a la incertidumbre para reducirla; es el sentido más directo y menos metafórico de la palabra. O sea, un animal no se anticipa al hecho de morir de inanición cuando come, ni se anticipa al acto de ser derribado cuando huye a la carrera. Tampoco se anticipan ciertos pájaros de montaña que se pasan el verano recogiendo piñones y escondiéndolos para encontrarlos luego durante el duro invierno (se ha comprobado que un solo ejemplar llegó a preparar más de mil escondites). Nadie se quejaría si usamos la palabra antici-

par en estos casos. Por eso necesitamos refinar el concepto para dejarlo entrar en nuestro esquema conceptual. Estos casos se refieren a una anticipación preprogramada favorecida por la selección natural gracias a que la incertidumbre del invierno es periódica (y por lo tanto no tan incierta). Digamos que es una incertidumbre previsible. De hecho, en estos casos, lo que se anticipa es el pasado, que es de lo que suelen acusar los físicos a los economistas cuando los quieren hacer rabiar. En realidad se trata de una adaptación por selección natural con resultado de aparente anticipación. En efecto, los mismos pájaros probablemente seguirían escondiendo piñones durante miles de años, después de una emigración forzada al trópico, cuyo invierno no requiere tal clase de previsión. El sentido que damos aquí a la anticipación es un concepto novísimo que se da cuando el individuo se enfrenta a una situación inédita de su entorno y lo hace mediante un proyecto, una intención, una voluntad, un objetivo. La anticipación es la función propia del conocimiento, su plusvalía por superar la selección natural. La anticipación con este significado abre la edad de la tercera y última clase de selección, la *selección cultural*.

Está claro que en el fondo del mundo de las ideas, muy en el fondo, las leyes fundamentales regulan una población de partículas elementales. Pero aquí la Constitución de la realidad se caracteriza por un individuo bien definido, el propietario de la mente. Pero el concepto «mente» necesita alguna clase de introducción. Abramos un breve paréntesis: ¿cómo se llega a la inteligencia abstracta a partir de las fuerzas fundamentales de las partículas elementales? O para no volver tan atrás: ¿cómo se llega a la inteligencia abstracta desde la simple capacidad de una bacteria para intercambiar una información con su entorno?

Hoy no parece muy correcto en biología usar términos como inferior y superior, abajo y arriba... [30] La razón estriba sin duda en el riesgo de colocar al ser humano (y por extensión a la propia identificación colectiva de compatriotas, correligionarios, familia) en el centro de todo esquema conceptual. Es una razón más que comprensible. En el capítulo octavo nos extenderemos un poco con el llamado principio de mediocridad, que siempre ha resultado recomendable a la hora de pensar la ciencia. Pero la razón más fuerte quizá radique en la dificultad de definir el término progreso de una manera objetiva, inteligible y dialéctica. Algo hay de ambas cosas. Un ser humano elabora siempre

conocimiento de ser humano (por más objetivo que intente ser) y, como veremos más adelante (porque lo vamos a intentar), no es fácil proponer una buena definición del término «progreso». Asumo ambas dificultades. Pero dado que a estas alturas ya estoy del todo convencido de que ni yo ni mi especie ni mi familia ni mi país ni mi cultura ni mi supuesta religión ni mi supuesto equipo de fútbol han sido elegidos para nada en absoluto y dado que nada de lo anterior en nada amenaza la convivencia humana de mis vecinos en los tiempos que se acercan, me permito declarar de dónde procede la intuición que me empuja a proponer una, creo, buena definición de progreso. Podría expresarse así:

Entre la emergencia de la primera bacteria y el nacimiento de Shakespeare algo ha progresado, algo, de abajo arriba, ha tenido que ocurrir...

La mera consideración de la magnitud tiempo nos da una idea de cómo ha evolucionado la realidad. Hay conceptos ordenados en el tiempo. La selección natural es un logro de la selección fundamental y la selección cultural un logro de la selección natural. Hemos mencionado, aunque no desarrollado aún, la idea de selección cultural (pero, como el lector habrá intuido, está al caer). Ni la inteligencia surgió antes que la vida, ni la vida antes que la materia inerte. La cuestión que nos ocupa ahora, la inteligencia, también accedió a la realidad de menos a más. El volumen del cráneo de los homínidos quizá no signifique mucho, es verdad, pero más bien crece que lo contrario. Los cuadrúpedos de los que descienden los homínidos tenían un volumen craneal de unos 350 cm^3; el *Australopithecus,* inventor del bipedismo, entre 450 y 750 cm^3; el *Homo habilis,* inventor de la industria lítica, unos 1100 cm^3; el *Homo erectus,* inventor del fuego, entre 850 y 1100 cm^3; y el *Homo sapiens,* inventor de la inteligencia abstracta, más de 1400 cm^3... Algo parecido se observa en la evolución de la vida. Una planta es más inteligente que una piedra, un mamífero arcaico más que cualquier reptil, un mamífero moderno más que cualquier mamífero arcaico y un ser humano más que cualquier otro mamífero. Para ello ni siquiera hay que esmerarse en definir la inteligencia ni comprometerse demasiado con alguna forma concreta de estimar su valor. La inteligencia también tiene grados y su emergencia en la realidad también es, con perdón, de abajo arriba.

La inteligencia abstracta es un logro de la selección natural que trabaja a favor de la permanencia en la realidad viva. Si la inteligencia es, como mínimo, una capacidad que tiene que ver con el intercambio de información, digamos que no se puede estar vivo sin estar dotado de un mínimo de inteligencia. Sí, la inteligencia, una prestigiosa estrategia para relacionarse con el resto del mundo, tiene grados. La inteligencia mínima es la no inteligencia. Una piedra no percibe su entorno. Por ello depende mansamente de su incertidumbre. La inteligencia de una piedra es de grado cero.

Un ser vivo, poco o mucho, siempre recibe y emite información. Las hormigas marcan químicamente el camino para volver a casa. Es un plan escrito en su genes. La especie neotropical *Odontomachus bauri* tiene, además, una curiosa alternativa: cuando sale a explorar el bosque, frena en seco cada quince segundos para mirar la cúpula de los árboles. Camina, se detiene, levanta la cabeza, mira, memoriza y reanuda la marcha. Un, dos, tres, cuatro, un, dos... Así consigue grabar, en su minúsculo cerebro, una secuencia ordenada de imágenes, figuras negro sobre blanco de las ramas contra el cielo. Para volver al hormiguero sólo tiene que *pulsar* un conmutador cerebral: a partir de ese momento ya no se mira para *grabar* sino para *cotejar*. Las imágenes avistadas durante la vuelta deben coincidir, en orden inverso, con las grabadas durante la ida. Es un buen plan. Es, digamos, el plan A. Pero la inteligencia de esta clase, por muy espectacular que parezca el plan, es sólo de grado uno. Si falla el plan A, la hormiga quizá salte al clásico plan de las feromonas, pero nunca buscará un plan B que no esté *pre*parado en sus genes. Cuando una hormiga cambia es que ya se ha convertido en otra especie. La inteligencia de grado uno sólo se anticipa a lo previsible. Las verdades de hormiga (de bacteria, medusa o calamar) no caducan. Eso es cosa del grado dos.

Un pulpo hambriento mira con interés a un cangrejo encerrado en un frasco. El pulpo intentará primero el plan A: agarrar la presa a través del vidrio. El plan falla. Y el genoma del pulpo no incluye otro plan tipo «cangrejo envasado». Pero el pulpo (que no un calamar) se pone a buscar una alternativa. Y la encuentra: abrir el frasco. Su inteligencia, azuzada por el hambre, es de grado dos: aquella que busca un

plan B cuando falla el A. El pulpo aprende de las contingencias de su entorno. Pero ningún pulpo es capaz de controlar un instinto en función de otra cosa que no sea otro instinto mayor. La vigencia de una verdad de pulpo cambia frente a ciertas contingencias, sí, pero sólo con el permiso de sus instintos más fuertes. Anticipa algo con lo que nunca se ha enfrentado antes, pero su objetivo es satisfacer una necesidad inmediata. Otra cosa requiere aún un grado más.

Un perro (que no un caballo) puede ignorar, durante horas, sus urgencias más imperiosas, si lo que hay bajo sus patas es una alfombra. El perro es capaz de evaluar una situación particular de su entorno y, en función del resultado, desprogramar ciertos automatismos. Es la inteligencia que administra instintos, la de grado tres. La verdad de perro cambia, mal que le pese a su instinto, sí, pero no se eleva mucho sobre lo particular. Para eso hace falta algo más.

Es el grado cuatro. Es la inteligencia que puede descubrir una esencia común en dos casos distintos (comprender). Es la inteligencia de la inteligibilidad. Es la cultura. Con ella un chimpancé fabrica (y repara) instrumentos para cazar termitas. Con ella se puede dibujar, cocinar y hacer ciencia. La verdad inteligible es la única que cambia por oficio y es, por lo tanto, idónea para seguir vivo en un mundo cambiante. Con ella incluso se puede, por ejemplo, organizar la convivencia humana (aunque el detalle se nos olvide cien veces al día). La inteligencia abstracta, la representación simbólica es un logro de la selección natural que permite lo que bien podríamos llamar la selección artificial o, mejor, la selección cultural.

Con ella, el salto del comportamiento frente a la incertidumbre es enorme. Ahora no basta con resistirla o modificarla para perseverar en la realidad. Los objetos con inteligencia abstracta, además de resistir y modificar la incertidumbre, tienen una capacidad más: la anticipan. La anticipación de la incertidumbre introduce una novedad radical en el universo: la idea de objetivo, la idea de proyecto, la idea de cambiar el mundo con un propósito, con una intención, una opción entre muchas posibles se selecciona con una dirección. Es la selección cultural. En resumen:

El objeto dotado de inteligencia abstracta, además de resistir la incertidumbre de su entorno y modificarla *es capaz de anticiparla. Esta*

capacidad, que se añade a la estabilidad, la adaptabilidad y la capacidad de evolucionar, es la capacidad para conocer, lo que se consigue por selección cultural. *El conocimiento representa la tercera forma de rebelión contra la incertidumbre. Es la estrategia en el sentido genuino de la palabra, es la estrategia dotada de proyectos que mejoren nuestra independencia de los caprichos ambientales. El conocimiento se alimenta a sí mismo para seguir conociendo y es la base de una innovación universal: la creatividad humana.*

La selección natural de las ideas

Quizá valga la pena detenerse un momento para ver cómo encajan en este esquema algunas ideas importantes de la biología moderna. Hace tiempo que lo venía sospechando. Las grandes ideas de la complejidad son simples. Lo es la misma idea de Darwin: perseveran las innovaciones que ayudan a que lo vivo siga vivo. Pero ¿sobre qué clase de individualidad actúa la selección: una población, una especie, un organismo, un gen? El darwinismo tradicional (anterior al concepto de gen) se refiere a los organismos que compiten por sobrevivir. Pero hay casos que no encajan. Uno clásico es el de los pájaros que chillan cuando perciben una amenaza. El grito ayuda más bien al depredador que, muy probablemente, ni siquiera había descubierto aún a su presa. ¿Cómo puede la selección natural favorecer tal cosa? La respuesta está en otra simple gran idea, la del *gen egoísta*.

Richard Dawkins debe su celebridad a dos ideas y ésta es la primera. Sin embargo (y como ocurre tantas veces en ciencia), la idea no es suya. El primero en proponerla, en los años sesenta, fue William Hamilton, en mi opinión, el biólogo más brillante del siglo XX. George Williams la generaliza poco después. Y Dawkins, en los setenta, le pone nombre, la radicaliza y en 1976 escribe un libro maravilloso, *El gen egoísta*. Su mérito: encandilar, provocar y renovar el gran debate de la evolución.

El nuevo esquema conceptual resuelve el enigma del pájaro. El pájaro que chilla muere por chillar, es verdad, pero el chillido favorece a sus semejantes, que, gracias a la alarma, tienen tiempo para ponerse a salvo. El gen es una unidad de información capaz de replicarse y de

propagarse a través del mundo vivo. Se trata de una información que se traduce en una propiedad observable en el organismo, como, por ejemplo, chillar ante una amenaza. La selección no actúa sobre el organismo ¡sino sobre el gen! El organismo muere, los genes continúan. El organismo puede ser altruista, el gen es siempre egoísta. Chillar va en contra de quien chilla (el organismo) pero a favor de la idea de chillar (el gen). Por cierto, ¿vendrá de ahí el irracional grito de terror que sigue a un sobresalto? En un momento de euforia, Dawkins llegó a decir que los organismos no somos más que excusas inventadas por los genes para pasear su propio éxito (!).

Pero el gen egoísta también tiene sus paradojas. Por ejemplo: la simbiosis. El pacto simbiótico debe ser honrado, porque si alguna parte contratante se hace la lista, la situación derivará hacia la explotación o el parasitismo, lo que, tarde o temprano, acaba con todo. La selección bendice aquí una unión de genes diferentes de diferentes genomas... ¡No pueden ser tan egoístas! El debate sigue abierto, pero ha dado sus frutos. Dawkins ya no es tan radical y sus adversarios, como el desaparecido Gould, ya admiten la trascendencia selectiva del gen, entre otras cosas porque sirve incluso para explicar las selecciones en niveles superiores de la jerarquía biológica, como el grupo o la especie. Quizás haya que distinguir entre unidad selectiva y unidad evolutiva. Una cosa es la individualidad que pasa el examen y otra cosa la individualidad que persevera... Acuda quien acuda al examen, el que lo supera es siempre un gen.

La segunda gran idea simple es el *meme*. Como Dawkins mismo reconoce, la idea tampoco es suya. Hacía ya tiempo que se hablaba de la selección natural de las ideas. Pero Dawkins sabe que en ciencia hay otros dos méritos tan importantes como concebir una simple gran idea: 1.° Darse cuenta de que lo es y 2.° Convencer de ello a los demás. En el último capítulo del citado libro, Dawkins acuña para la historia el término *meme* y enciende otra polémica. El meme es el gen mental. Así de sencillo. Así de grandioso. El meme es un paquete cultural que se transmite por imitación. Su hábitat natural es el cerebro, allí nace y desde allí coloniza a otros cerebros. La selección natural de los genes explica parte de la vida, la selección natural de las ideas explica parte de la cultura. Decir selección natural de las ideas es como decir selección natural de la selección cultural.

Dawkins aborda así el conocimiento revelado:

«Consideremos la idea de Dios... Es probable que haya surgido varias veces por "mutaciones" independientes... ¿Cómo se replica? Por la palabra hablada y la palabra escrita con la ayuda de la gran música y el gran arte... ¿Qué tiene el meme-Dios para ser tan estable y penetrante en el mundo de la cultura? Su supervivencia procede de su enorme atractivo psicológico. Provee una respuesta superficial y plausible a las cuestiones más profundas y turbadoras de la existencia. Sugiere que las injusticias en esta vida pueden corregirse en la siguiente...».

El éxito de tantas sectas, supersticiones e ideologías fanáticas se comprende mejor con la ayuda del *meme egoísta*, un virus mental que parasita la mente con independencia de la suerte de ésta. Pero el progreso del conocimiento también encaja en este esquema. Cuando un científico tiene una buena idea, se la pasa a alumnos y colegas. Unas ideas se perpetúan. Otras se extinguen. ¿Por qué no hablamos ahora de placebos existenciales o de infecciones mentales? La clave quizás esté en el mismo mecanismo de selección. Los memes superan la selección, creo, en virtud de dos grandes criterios. Uno tiene que ver con el fortalecimiento de la cohesión de una identidad colectiva de mentes... El otro consiste en aumentar la capacidad mental de anticipación: el conocimiento. Los memes de la primera clase compiten con memes de su misma especie: otra nacionalidad, otra religión, otro club, otro clan, otra familia, otra tribu, otra escuela... Su perseverancia se lidia a bofetadas entre las distintas identidades colectivas y se perpetúa como valor irrenunciable de la vencedora (léase la historia de la infamia de la humanidad, léase cualquier diario de cualquier día). Los memes de la segunda clase compiten también con los de su especie: otras ideas con la misma pretensión de comprender la misma realidad. Pero su perseverancia se decide ahora por colisión continua con la evidencia y se perpetúan por las bibliotecas como un valor renunciable. Ambas líneas de evolución se cruzan sólo en actos tan significativos como la quema de libros. El hecho diferencial tiene nombre: la *fe ciega*.

Los memes son paquetes que surgen y se elaboran dentro de una mente por selección cultural. Pero una vez lanzados a la piscina de la

convivencia humana, pueden evolucionar por selección natural. Volveremos sobre este tema crucial, que está en la base misma de una disciplina que bien podríamos llamar conocimiento político.

Muchos objetarán que el meme no es más que una metáfora. De acuerdo, pero lo mismo ha ocurrido con casi todos los grandes conceptos de la ciencia. Ocurrió con el átomo durante milenios y ha ocurrido con el propio gen durante décadas. El meme ya ha demostrado, él mismo, ser un meme excelente, ya que ha pasado de las páginas del último capítulo del libro de Dawkins en 1976 a los diccionarios de muchas lenguas treinta años después. Creo que le he oído al propio Dawkins decir que el meme ya hay que manejarlo con un rango superior al de mera metáfora.

Los estímulos

En el mundo vivo las grandes funciones se consolidan con grandes estímulos. No comeríamos sin hambre (los inapetentes hace mucho que han muerto de hambre por falta de hambre), no beberíamos sin sed, no nos cuidaríamos sin dolor, no nos reproduciríamos sin impulso sexual... Tanto en la realidad inerte, como en la realidad viva, como en la realidad culta se cumple que entre hacer y no hacer, mejor no hacer. En el mundo inerte, los objetos tienden a su estado de mínima energía. En el mundo vivo, los objetos tienden a gastar la menor energía posible y a reducir los riesgos al mínimo. Los estímulos son necesarios para garantizar unas funciones que de otro modo decaerían hasta desaparecer. La selección cultural es el resultado de la actividad mental y de la capacidad de abstracción. ¿Cuál es el estímulo que va a favor del conocimiento? Sin tal estímulo la mente también elegiría *no hacer* en lugar de *hacer*. ¿Cuál es el estímulo de la creatividad humana? Cuando se trata de ciencia se suele hablar de curiosidad, cuando se trata de arte se suele hablar de emoción... Quizá se pueda asegurar que los estímulos, en el mundo vivo, se basan en último término en el binomio placer-dolor, un espectro de alternativas que van desde la promesa de premio hasta la amenaza de castigo. En el caso del conocimiento es muy posible que el miedo sea un estímulo bastante más potente que la curiosidad. El miedo nos hace medir el riesgo, el miedo nos empuja a an-

ticipar la incertidumbre. Por lo tanto, el miedo nos empuja a ganar conocimiento. El gozo por conseguirlo es un buen estímulo complementario. Leamos lo que escribe Baruj Spinoza en la proposición 11 de la tercera parte de la *Ethica ordine geometrico demonstrata:* [8]

> «Proposición 11: La idea de todo aquello que aumenta o disminuye, ayuda o reprime la potencia de actuar de nuestro cuerpo, aumenta o disminuye, ayuda o reprime la potencia de pensar de nuestra alma».

Y he aquí cómo empieza la explicación de esta proposición (en el escolio):

> «Vemos, pues, que el alma puede sufrir grandes cambios y pasar ora a una mayor ora a una menor perfección; y estas pasiones nos explican los afectos de la alegría y la tristeza. En lo sucesivo entenderé, pues, por alegría la pasión por la que el alma pasa a una perfección mayor; por tristeza en cambio, la pasión por la que la misma pasa a una perfección menor. Además llamo placer o jovialidad al afecto de alegría que se refiere a la vez al alma y al cuerpo; dolor o melancolía, en cambio, al de tristeza. Pero hay que advertir que el placer y el dolor se refieren al hombre en cuanto que una parte suya está más afectada que las demás; la jovialidad y la melancolía, en cambio, cuando todas son igualmente afectadas. Qué sea además el deseo, lo he explicado en el escolio de la proposición 9 de esta parte. Y, aparte de estos tres no admito ningún otro afecto primario, ya que en lo que sigue demostraré que los demás surgen de estos tres».

En el epílogo de la segunda parte trataremos de nuevo esta cuestión.

Cada tipo de selección encuentra así su lugar en nuestro esquema conceptual. Estamos ante el sentido hondo y general de las tres clases de selección: favorecer todo aquello que merece perseverar en la realidad de este mundo: seguir estando en el mundo inerte, seguir vivo en el mundo vivo y seguir conociendo en el mundo culto. El esquema se resume así:

Todo lo real es real por selección. La selección sólo puede ser de una combinación de estas tres clases: fundamental, natural y cultural

(en el epílogo especularemos sobre la posibilidad de una cuarta). El criterio de selección que abarca las tres selecciones es uno: perseverar en la realidad ya sea como objeto inerte, vivo o culto. La idea de Darwin de la selección natural, que tanto conmovió al pensamiento de su tiempo, se acomoda así a un esquema conceptual más amplio.

5
Hacia Darwin de la mano de Spinoza
ante la mirada crítica de Kant

Ernst Mayr, zoólogo de la Universidad de Harvard, es sin duda uno de los evolucionistas más influyentes del siglo XX y, con Ruse y Dennet, uno de los pensadores que más se ha preocupado de analizar el contexto filosófico de las teorías de Darwin, muy especialmente las consecuencias de su mecanismo central, la selección natural [31], [32] y [33]. Tal es sin duda la propuesta más audaz de Darwin, la más innovadora. Según Mayr, la idea de Darwin no tenía precedentes en la historia de la filosofía desde los presocráticos hasta Descartes, Leibniz o Kant. Aunque Darwin sólo (¡!) pretendía hacer inteligible la armonía y la adaptabilidad de la realidad viva, la verdad es que consiguió, además, un efecto colateral: barrer la teología de las explicaciones de la naturaleza. Cuando Darwin inició su viaje en el *Beagle* creía en la necesidad de un creador supremo, pero me temo que cambió de opinión al ordenar los papeles de sus observaciones. Todo eso es cierto. Pero yo no sería tan drástico en cuanto a la ausencia total de precedentes de prestigio.

Creo que ha habido por lo menos un pensador que ha llegado a rozar la idea de selección natural *avant la lettre*. Y eso a pesar de haber pasado a la historia como un determinista de corazón, a pesar de nombrar a Dios con frecuencia en sus escritos y de vivir en el siglo XVII. Sólo un filósofo panteísta (tal vez incluso un ateo clandestino) podía hacerlo sin demasiadas contradicciones. Se trata, claro, de Baruj Spinoza. Volvamos a él para dar una fina pátina de solera filosófica a nuestra generalización del concepto de selección.

Atendamos a las proposiciones 6 y 7 de la tercera parte de su *Ética* [8]. La sexta proposición es tan célebre que incluso tiene nombre, el *conatus*. La frase, porque se trata de una frase, concentra la esencia de esta primera parte y puede leerse como un principio fundamental de la

realidad del mundo. La séptima es todo un homenaje a la idea de inteligibilidad en ciencia que deseamos promocionar aquí:

«Proposición 6: Cada cosa, en cuanto está en ella, se esfuerza por perseverar en su ser.
»Proposición 7: El conato con el que cada cosa se esfuerza en perseverar en su ser no es sino la esencia actual de la misma».

La demostración de la primera, siempre con palabras de Spinoza:

«Demostración de la proposición 6. En efecto, las cosas singulares son modos en los que se expresan de una cierta y determinada manera los atributos de Dios; es decir, son cosas que expresan de cierta y determinada manera la potencia de Dios, por la que Dios es y actúa. Y ninguna cosa tiene en ella algo por lo que pueda ser destruida o que suprima su existencia; sino que, por el contrario, se opone a todo lo que puede suprimir su existencia. Y por tanto se esfuerza, en cuanto puede y está en ella, por perseverar en su ser».

Impecable. Sólo hay que retocar unos detalles para arrimar a Spinoza a nuestra ascua. El primer detalle es la noción de Dios. Nunca me he librado de la idea de que Spinoza fue en realidad el primer gran ateo, por lo menos el primero que hizo todo lo posible por manifestar su ateísmo sin que ello le costase la vida. Ahora ya no tenemos este problema. Podemos cruzar sin miedo el umbral que separa las tinieblas de la claridad. Quizá sea suficiente sustituir a Dios por un concepto de nuestro esquema, la Constitución de la realidad, y Spinoza encajará como un guante en la globalidad de tal esquema. Ambos conceptos son infinitos. El primero no lo vamos a descubrir aquí. El segundo debe su infinitud a la idea de *ley de la naturaleza* como una restricción (y no como una obligación). La sustitución no parece un salto demasiado terrible, sobre todo en este contexto panteísta de la divinidad. Hasta aquí la buena noticia, la convergencia. Ahora la mala noticia, la divergencia. Traducir a Spinoza al lenguaje del pensamiento científico tiene su atractivo. Ya hemos comentado que el autor de la *Ética* no concedía a la naturaleza el derecho a la contingencia. Saltar de una posición determinista a cualquier otra pasa por el infinito. Significa extender las

prohibiciones hasta el límite, un límite que sólo deja espacio para las obligaciones. Estamos aún cegados por el deslumbramiento de la luz newtoniana. La nervura de esta realidad equivale a un entramado de vías de dirección única que no se entrecruzan. El abismo parece insalvable porque la idea de selección es incompatible con la idea spinoziana de obligación, de evolución necesaria, de futuro atemporal, de pasado atemporal, de historia atemporal. Sólo se puede salvar pasando por el infinito. Se necesitan infinitas prohibiciones para construir una obligación, una precisión infinita en las condiciones iniciales para el tiempo, una precisión infinita en las condiciones de contorno para el espacio... Spinoza pasa por el infinito cada vez que nombra a Dios. De hecho, es la distancia que le falta recorrer para ser un ateo completo. El panteísmo no consiste sólo en renombrar a Dios en lugar de la Naturaleza. Dios es necesariamente infinito, mientras que la Naturaleza es presuntamente finita. Muy grande, pero finita. La metáfora de Feynman que compara la naturaleza con el ajedrez resiste incluso esta profunda cuestión. El número de partidas jugables es finito, pero tan enorme que nos permite hablar de jugadores creativos y geniales, tan enorme que podemos organizar torneos porque no está escrito de antemano quién va a ganar. Nosotros optamos, en cambio, por evitar el infinito. Nuestra pretensión es construir un esquema conceptual de la realidad sin el recurso de salirnos de ella. Espero que no suene del todo irreverente, pero pretendemos comprender la realidad sin la ayuda de Dios. Asumimos la brillante intuición de Spinoza con este retoque de cincel.

El segundo detalle se refiere a la esencia de las cosas. Spinoza utiliza expresiones que obligarían a cualquier físico teórico moderno a poner pies en polvorosa. Por ejemplo: «la cosa en cuanto está en ella» o «la cosa singular». Es el recurso de Spinoza para no referirse a cualquier cosa. No toda cosa de la realidad tiene un ser en el que perseverar. La sentencia de Spinoza se restringe a las cosas singulares, a las cosas en cuanto están en ellas. En nuestro vocabulario hay que traducir ese concepto por lo que hemos llamado individualidad. Nos hemos preocupado de preparar el concepto. La individualidad que define una realidad particular: la partícula, el átomo, la molécula, el gen, la célula, el organismo, la mente, la manada, la sociedad... La selección natural tampoco actúa sobre cualquier cosa, actúa sobre una individualidad capaz de perseverar... Persevera la cosa que tiene ser en el que perseverar.

Nada de lo que accede a la realidad contiene en sí mismo nada que sea contradictorio con la realidad en la que aterriza. Tal alternativa sería incompatible con su particular Constitución de la realidad. Dicho con palabras cultas del siglo XVII, hoy quizá suene un tanto extraño hablar de un objeto que se esfuerza por lograr un objetivo. Pero es una metáfora compatible con la idea de selección. La cosa con ser que no persevera en su ser no es una cosa real. Se accede a la realidad por compatibilidad con la Constitución del mundo. La Constitución selecciona lo real en virtud de su propia combinación de leyes y azar. Toda fluctuación posterior del entorno del objeto es un reto para seguir estando en la realidad o para volver a esperar en la cola de lo sólo realizable (en el dominio de lo lógicamente posible). Se diría que Spinoza, cuando habla de *cosa*, piensa en el alma. Sin embargo, podría haber dicho alma y dice cosa. Pero no se trata de cualquier cosa, sino de una cosa que se identifica con un aspecto o una parte de sí misma. Y es en ello, en su ser, en lo que tiende a perseverar.

De nuevo nos tropezamos con la sombra de una circularidad de donde puede surgir la propia fuerza de la sentencia. El ser de una cosa es aquel aspecto de la cosa que mejor lo tiene para permanecer en la realidad. El ser es la esencia de la cosa, aquella por la que la cosa que ya existe sigue existiendo. No existen dos árboles iguales, incluso cuando ambos proceden de dos semillas del mismo árbol. Ambos objetos podrían prescindir de sus diferencias (matices), pero nunca de lo que tienen en común (esencia). Lo que tienen en común es el ser, justo aquello que les permite seguir vivos en el bosque. Persevera más el concepto «árbol» que un árbol concreto; persevera más una especie de árboles que un árbol particular de una especie. Estamos ante una idea crucial porque en ella descansa la posibilidad de un salto del concepto «individuo» de un nivel jerárquico a otro. En efecto, creo que hablar del altruismo de las hormigas, por ejemplo, es un imperdonable abuso de lenguaje, en el límite mismo de una metáfora. Si parte de las obreras de una colonia se suicidan para hacer de ladrillo improvisado o de puente para que pase el resto de la colonia, no es por altruismo entre individuos. Es al servicio de una causa mayor, el superorganismo. Lo que la obrera víctima favorece no es otra hormiga obrera, sino el hormiguero (abstenerse de analogías humanas). Conviene echar ahora un vistazo a la demostración de la proposición séptima:

«Demostración de la proposición 7: De la esencia dada de una cosa cualquiera se siguen necesariamente algunas cosas, y las cosas no pueden más que aquello que necesariamente se sigue de su naturaleza determinada. De ahí que la potencia de cualquier cosa o el conato con el que ella, sola o con otras, hace o se esfuerza por hacer algo, esto es, la potencia o el conato con el que se esfuerza en perseverar en su ser, no es nada más que la esencia dada o actual de esa misma cosa».

La idea viene a ser algo así como la esencia de la esencia. Si el ser es la esencia que se concreta en la cosa, la tendencia del ser a seguir siendo no es sino la esencia del ser. Para muchas cosas de este mundo, el ser sería su estado más probable, y la esencia del ser sería la garantía de su permanencia en la realidad: su estabilidad en el sentido amplio de la palabra. Un volumen de agua, por ejemplo, es una cosa cuyo ser, en ciertas condiciones del entorno, es un objeto con la forma del recipiente, cuya superficie libre es horizontal a la superficie del planeta y cuya temperatura sigue, con mayor o menor inercia, la temperatura del entorno inmediato. Para ciertas fluctuaciones de las condiciones ambientales, la cosa acaba siempre regresando a su ser. El volumen de agua sigue la incertidumbre ambiental pero tiene un estado estable. Su ser estable es el destino final, el centro al que siempre regresan las fluctuaciones. Pero la estabilidad no está garantizada en un dominio ilimitado. Cada estabilidad tiene una región de validez (en palabras de Spinoza: mientras no se salga de la cosa). Si el objeto se sale de este dominio, las fluctuaciones pueden no regresar y el objeto puede ser arrastrado lejos hasta encontrar (o no) nuevas estabilidades. Si las fluctuaciones de temperatura, por ejemplo, se alejan demasiado y entran en valores negativos, la cosa puede dejar de perseverar en su ser. El estado sólido del agua corresponde a otra familia de cosas con otro ser. Cualquier transición de fase en física equivale a un cambio de ser. Un huevo puede soportar ciertas variaciones de temperatura sin cambiar su ser, sin perder su capacidad para engendrar un nuevo animal. Pero si las fluctuaciones son demasiado amplias, la irreversibilidad puede ser trágica. Un huevo cocido no recuperará su gelatinosa viscosidad aunque el entorno vuelva a enfriarse. Y mucho menos será capaz algún día de engendrar un nuevo ser vivo. En cualquier caso, existe toda una fa-

milia de cosas que resisten la incertidumbre ambiental, que perseveran en su ser a pesar de que no pueden evitar doblegarse a los caprichos de la incertidumbre. Estas cosas siguen mansamente las fluctuaciones de la incertidumbre del entorno, pero su ser es tal que las resiste. Ya hemos nombrado esa clase de cosas. Son los objetos inertes. ¿Cuál es el ser de un objeto inerte? El ser spinoziano de objeto inerte es, en principio, el estado seleccionado por la selección fundamental. En nuestro lenguaje es el estado más estable. La selección fundamental provee de resistencia frente a la incertidumbre. En eso se basa la estabilidad física. Y representa la primera versión de la rebelión de los objetos reales frente a la amenaza de dejar de serlo. Veamos algunos ejemplos.

No toda cosa de este mundo inerte resiste con la misma insistencia la incertidumbre del resto del mundo. Pensemos en un objeto que puede acceder a dos estados distintos. Una silla apoyada sobre sus cuatro patas es tan cosa inerte como otra silla igual que se sostenga sobre una sola de sus cuatro patas. Las dos situaciones son compatibles con la Constitución de la realidad que les ha tocado en suerte. En efecto, ambos estados son estados de equilibrio permitidos por las leyes fundamentales de la mecánica. Ambas situaciones cumplen las condiciones del equilibrio mecánico: la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el centro de masa es cero y cero es la suma de los momentos de todas las fuerzas respecto del mismo punto. Esto garantiza que la silla, en cualquiera de estos dos estados, ni gira sobre sí misma, ni se traslada. Los dos estados son equivalentes si la incertidumbre reinante es constante y perfectamente igual a cero. En cualquier otro caso se rompe la equivalencia porque los dos estados (los dos seres) no resisten los caprichos de la incertidumbre con igual éxito. Su estabilidad es diferente. El apoyo sobre las cuatro patas corresponde a una situación de equilibrio estable, el apoyo sobre una sola pata implica una situación de equilibrio inestable. El primer caso tiene un dominio de razonable amplitud dentro del cual el objeto es capaz de recuperarse después del ataque de la incertidumbre. Hay que desplazar mucho la silla de su posición vertical para que ésta inicie un movimiento espontáneo sin retorno posible. El otro caso, el del apoyo sobre una sola pata, en cambio, es de una fragilidad infinita. Desde tal posición no se resiste la menor incertidumbre. La silla sobre cuatro patas se rebela contra la incertidumbre venciendo todas las fluctuaciones en torno a su

ser. Dentro del dominio de su estabilidad, el ser es inmune a la incertidumbre. La silla sobre cuatro patas es más estable (tiende más a perseverar en su ser) que la silla sobre una sola pata. Por eso su presencia en la realidad es mucho más frecuente que la silla en equilibrio sobre una de sus patas.

Imaginemos, para exprimir el ejemplo hasta la última gota, que entramos de repente en una sala que contiene doscientas sillas. Lo más probable es que la sorprendamos con todas sus sillas sobre sus cuatro patas. ¿Es imposible encontrarse con las doscientas sillas sobre una sola pata? La verdad es que no, pero sí muy poco probable. Si así fuera, nos quedaríamos estupefactos o nos daría un ataque de risa. Inmediatamente pensaríamos en un truco. No hay contradicciones lógicas o físicas para tal experiencia. La situación es imaginable. Sin embargo, no obedece a la proposición sexta de la tercera parte de la *Ética* que acabamos de citar. No resiste la incertidumbre, no se puede mantener en la realidad ni siquiera en el caso improbabilísimo de que acceda a ella. El oficio de malabarista se basa justamente en crear improbabilidades que emocionan al espectador. La emoción se obtiene justo de una improbabilidad. Piénsese en el célebre número de los platos que giran sobre varas verticales. La conservación del momento cinético hace que mientras el plato conserva cierta velocidad de giro se mantiene sobre la vara. Un buen malabarista puede mantener el giro de más de diez platos corriendo como un poseso de uno a otro para devolverles la energía que pierden por fricción. Pero ni el mejor malabarista de todos los tiempos conseguiría mantener doscientas sillas sobre una sola de sus patas. Es como esos elementos químicos que aún no hemos descubierto debido a su radical e intrínseca inestabilidad. Son tan improbables que nunca salen en una foto de la realidad. Por eso no figuran en el gran catálogo. Son cosas fuera de su ser.

La clase de selección que aquí hemos llamado selección cultural está implícita en el *conatus*, y no hay que hacer grandes esfuerzos para relacionar la obra de Spinoza con esta idea. El filósofo le dedica una proposición explícita cuya demostración y escolio sólo hay que traducir mentalmente. Nos ponemos manos a la obra porque con ello completamos el soporte spinoziano de nuestro esquema conceptual y, por el mismo precio, la noción spinoziana de *deseo*, que antes hemos dejado pendiente. Ahora toca la proposición novena:

«Proposición 9. Tanto si tiene ideas claras y distintas como si las tiene confusas, el alma se esfuerza en perseverar en su ser por una duración indefinida y tiene conciencia de ese esfuerzo suyo.
»Demostración: La esencia del alma está constituida por ideas adecuadas e inadecuadas. Por tanto, se esfuerza en perseverar en su ser lo mismo en cuanto que tiene éstas como en cuanto que tiene aquéllas, y por ello por cierta duración indefinida. Pero, como el alma es necesariamente consciente de sí misma por las ideas de las afecciones del cuerpo, se sigue que el alma es consciente de su conato.
»Escolio: Este conato, cuando se refiere sólo al alma, se llama voluntad; en cambio, cuando se refiere a la vez al alma y al cuerpo, se llama apetito. Éste no es, pues, otra cosa que la misma esencia del hombre, de cuya naturaleza se sigue necesariamente aquello que contribuye a su conservación y que el hombre está, por tanto, determinado a realizar. Por lo demás, entre apetito y deseo no hay diferencia alguna, excepto que el deseo suele atribuirse a los hombres en cuanto que son conscientes de su apetito; y por tanto puede definirse así: el deseo es el apetito con la conciencia del mismo. Por todo esto consta, pues, que nosotros no nos esforzamos, queremos, apetecemos ni deseamos algo porque juzgamos que es bueno, sino que, por el contrario, juzgamos que es bueno, porque nos esforzamos por ello, lo queremos, apetecemos y deseamos».

Gracias, Baruj Spinoza. Las tres clases de selección de nuestro esquema encajan en estas proposiciones. La selección cultural no difiere de la selección natural ni de la selección fundamental en cuanto al *conatus*. La selección es una rebelión cuyo resultado es perseverar. La realidad de este mundo, sencillamente, está hecha así. La primera función de la selección cultural, y por tanto de la cultura y de cualquier clase de conocimiento, no está en sus presuntos logros, está en el propio conocimiento, en el proceso de construirlo, de elaborar representaciones, en el proceso de pensar, en el gozo mental de seguir pensando. Anticipar la incertidumbre es sin duda un regalo asociado a lo que en principio debió de ser sólo gozo mental. La sentencia compacta de la insistencia de lo real en seguir siéndolo suena así:

Lo inerte está y tiende a seguir estando, lo vivo vive y tiende a seguir viviendo y lo culto conoce y tiende a seguir conociendo.

Es otra versión de la partición de la realidad en sus tres grandes vertientes: lo inerte, lo vivo y lo culto. Cualquier objeto o fenómeno admite esta primera y relevante clasificación, una relevancia que arranca de las tres clases de selección con el mismo nombre, las cuales a su vez proveen comprensión e inteligibilidad del mundo gracias a su capacidad para acumular garantías para perseverar. No olvidemos que cada estado de la materia está contenido en el anterior. La vida es una rebelión que puede ayudar a seguir estando, y el gozo mental una rebelión que puede ayudar a seguir vivo.

Hay dos filósofos con fuertes intuiciones científicas. Uno es Spinoza. El otro es Kant. Conviene ahora el ejercicio de interpretar a Spinoza según Kant. En especial, pensar cuál es la categoría kantiana de la idea que hemos tomado prestada del primero, el *conatus*. ¿Qué tipo de juicio es el *conatus?*

Un juicio analítico es aquel cuyo predicado es parte del sujeto: «un grillo es un insecto». Un juicio sintético es aquel cuyo predicado no está incluido en el sujeto: «un pájaro es capaz de bucear». Un juicio a priori es un juicio independiente de la experiencia (aunque se inspire en ella): «el perímetro de la circunferencia es 2π veces el radio». Ningún experimento puede desmentir eso. Un juicio a posteriori es un juicio que depende de la experiencia: «un material se dilata con el calor».

Todos los juicios analíticos son a priori. Trivialmente: no existe ningún juicio analítico a posteriori. No aportan nada nuevo al conocimiento, pero sí son valiosos para aclarar conceptos, para sugerir buenas definiciones y para transitar con seguridad de una a otra. También existen juicios sintéticos a posteriori. Son frágiles y dudosos pero útiles. El conocimiento puede progresar con ellos. ¿Existen juicios sintéticos a priori? Eso no está tan claro. Es la gran pregunta de Kant [34]. La polémica arranca antes de este pensador y aún perdura [35], [36] y [37]. Un juicio así abarcaría la solidez de lo a priori y la utilidad de lo sintético. En el límite equivale a una verdad eterna no trivial, una verdad que no depende de la realidad, pero que la hace inteligible, una verdad necesaria y universal que se inspira en la experiencia sensible, pero que no se origina en ella. Kant sugiere que la estructura

misma de la física se asienta en enunciados de esta clase. Ahora bien, las leyes fundamentales de la física o, como decimos aquí, las leyes fundamentales de la Constitución de una realidad no pueden ser juicios a priori, porque en tal caso nunca serían desmentibles por la observación o la experiencia. Parafraseando ahora a Popper: no serían falsables. Es decir, las leyes fundamentales de la ciencia no serían científicas (caerían fuera de la demarcación de lo que aceptamos como ciencia). ¿A qué se refiere Kant cuando reclama juicios sintéticos a priori para fundamentar la ciencia? ¿Sólo a las proposiciones de la matemática (tipo: sobre un plano, la distancia más corta entre dos puntos está sobre una recta)? La cuestión de la división de las categorías kantianas, la cuestión de la relevancia de los juicios sintéticos a priori y la cuestión de su trascendencia a la hora de levantar el edificio de la ciencia no están ni mucho menos liquidadas. A mí me gusta creer que la conveniencia de juicios sintéticos a priori en ciencia se refiere a principios pre o metacientíficos, es decir, principios anteriores o que ya van más allá de las leyes fundamentales de la naturaleza. Serían principios muy generales de la constitución de cualquier realidad, principios vigentes en cualquiera de sus niveles de observación, en cualquiera de sus nervuras. Quizás hablemos de algo que más tiene que ver con el método para conocer la realidad que con el conocimiento mismo de la realidad. Kant quizá se equivocó al creer que las leyes de la naturaleza, como las fundamentales de la mecánica y la física cuántica, podrían tener este estatuto de juicio sintético a priori, pero en su época, las leyes de Newton, por ejemplo, parecían necesarias, inevitables y del todo universales. La ciencia aún no había rodado lo suficiente para poder vislumbrar las entrañas de su estructura. Sin embargo, hay conceptos, como el de selección natural (aprovechemos la ocasión) y las otras dos selecciones introducidas aquí (la fundamental, la cultural y alguna otra aún por proponer), y algunos principios, como los de simetría o los variacionales en física, que muy bien podrían entrar en la sugerencia kantiana.

Científicos actuales, como Antonio Damasio [38], han encontrado muy recientemente en Spinoza un apoyo filosófico directo para hablar del funcionamiento del cerebro y del cuerpo en general. Es, por ejemplo, la tendencia del cuerpo a defenderse, a adaptarse para que todo vaya bien. Tales propuestas son bien concretas y locales, más próximas

a la idea de mecanismo, quizá próximas incluso a la idea de ley de la naturaleza. Pero tomemos ahora el *conatus* como un principio fundamental de la naturaleza, donde *perseverar* se refiere más a la idea de estabilidad física o continuidad de ese estado de la materia que llamamos vida, es decir, una especie de metaprincipio de donde gotean las leyes de la naturaleza, los mecanismos y eso que hemos denominado la nervura de lo real. En el caso de la selección natural, la clave estaría en seguir vivo, pero sin concretar cuál es la individualidad que lo consigue (la célula, el órgano, el organismo, la población, etcétera). Si consideramos el *conatus* de este modo, entonces creo que la sentencia «Cada cosa, en cuanto está en ella, se esfuerza por perseverar en su ser» puede calificarse de juicio sintético a priori. En primer lugar es sintético: el predicado no está contenido en el sujeto, puesto que podemos imaginar y nombrar objetos muy efímeros e inestables, sin contradicciones lógicas internas, que no se esfuerzan por perseverar en su ser. La sala con doscientas sillas todas apoyadas en una sola de sus cuatro patas es un objeto perfectamente imaginable que no satisface la sentencia de Spinoza. ¡Por eso no la encontraremos nunca en la realidad de este mundo! El *conatus* aventura una propiedad que poseen todos los objetos sucesos observables en la realidad. En segundo lugar es un juicio a priori porque, aunque se inspira en la realidad, no depende de ella. Es tan ilusorio programar una investigación destinada a encontrar una excepción del teorema de Pitágoras como comprometerse con una expedición destinada a encontrar una sala con doscientas sillas todas en equilibrio sobre una sola de sus cuatro patas. Hasta aquí el breve análisis kantiano del *conatus.* La reflexión no se agota con este apunte. Volvamos al eje de nuestro discurso.

El concepto de selección nos permite enunciar: todo es selección. Todo lo que ocurre, ocurre por una de las tres selecciones. ¿Y luego? ¿Puede una sucesión de selecciones interpretarse como una línea (en algún sentido) progresiva? Todavía necesitamos añadir un concepto a nuestro esquema. Es la función. La selección, en cualquiera de sus tres versiones, crea función.

6
Comprender la realidad
con la ayuda de lo que bien podríamos llamar función

Retrocedamos sólo un poco para tomar impulso. Las tres grandes efemérides de la historia, el origen del universo, la primera célula y el origen del conocimiento, introducen los tres grandes estados de la materia: inerte, viva y culta. Para acceder a cada uno de ellos hay que vérselas con tres tipos de selección. Nos proponemos ahora comprender la realidad con la ayuda de estos conceptos. Son los tres conceptos básicos del esquema conceptual. Los otros dependen, derivan o se clasifican según estos tres pilares.

A estas alturas necesitamos acordar el significado de dos conceptos más. El primero tiene que ver con la idea misma de comprender. ¿Qué clase de inteligibilidad buscamos?, es decir, ¿con qué clase de inteligibilidad vamos a admitir que estamos satisfechos, que hemos comprendido? Y, como veremos, la introducción de lo que significa comprender plantea un problema que resolveremos con la introducción del segundo concepto, el concepto de función. Lo adelantamos: la función, tal como la vamos a definir, es el concepto clave para comprender la realidad.

Empecemos por decir que una breve revisión de lo que significa comprender en las disciplinas tradicionales de la ciencia experimental puede desanimarnos. A primera vista, comprender no es lo mismo para un físico, un matemático, un biólogo o un economista. La física habla de leyes fundamentales; la química, de estructuras y de procesos; la biología lo hace de mecanismos; la geología, la paleontología o la arqueología hablan de reconstruir acontecimientos, es decir, de narrar historias; y la psicología, la economía o la sociología, de líneas de pensamiento, quizás incluso de ideologías. ¿Cabe poner un poco de orden en todo esto?

Hay por lo menos una cosa común a todas las disciplinas científicas: la voluntad de *comprender la realidad*. Además, existe un con-

cepto que es común a la idea de comprender y a la idea de realidad. Hemos estado hablando de él: es el concepto de selección. Consideremos de nuevo la realidad del universo en su totalidad para imaginar el enorme catálogo de todos los objetos y fenómenos que han accedido a la realidad a lo largo de la historia. Rebobinemos mentalmente esta historia para comprobar primero qué ha hecho la ciencia hasta ahora y para comprender la peculiar manera según la cual se ha desenroscado la evolución de la materia y la distribución de ésta en los distintos objetos.

Necesitamos sobrevolar de nuevo la materia, pero ahora armados con algunos de los conceptos introducidos. Según la cosmología vigente, en el principio de los tiempos la materia del universo se desparramaba según una especie de sopa homogénea de quarks. Todo objeto actual tiene una evolución particular que arranca de aquella lejana fecha. Atendiendo a esta evolución, hemos destacado tres acontecimientos especialmente trascendentes. El primero es, desde luego, la creación de la materia. La nada se rebeló contra sí misma y así surgió, digamos, la *materia inerte*, una materia capaz de resistir algo de las fluctuaciones de la incertidumbre. Algunos miles de millones de años después, en un rincón del universo, un pedazo minúsculo de materia inerte se rebeló contra la incertidumbre y se complicó lo bastante como para modificar algunas de sus fluctuaciones y ganar así cierta independencia de su entorno. Así se asomó la *materia viva* a la existencia. Y hace poco más de un millón de años, una parte bien modesta de la materia viva protagonizó la tercera gran rebelión y se complicó aún más hasta lograr anticipar algo de la incertidumbre. Así emergió la *materia culta* capaz de producir conocimiento abstracto y capaz de preguntarse, por ejemplo, por la evolución de la materia.

Esto nos permite introducir una partición de la historia de nuestro rincón del universo en tres grandes edades: 1.° La edad de la materia inerte, cuando sólo existía esta clase de materia; 2.° La edad de la materia viva, cuando sólo existía materia inerte y materia viva y 3.° La edad de la materia culta, en la que coexisten las tres clases de materia. Estamos en esta última, por lo que un objeto de la actualidad puede lucir propiedades de una, dos o tres de estas grandes eras de la historia universal.

Consideremos ahora la probabilidad de que un objeto de la edad de la materia inerte experimente un cambio. Esta probabilidad está condi-

cionada por la nervura de su realidad, es decir, por sus leyes, restricciones y por los objetos y sucesos de su entorno de espacio y tiempo. Que tal cambio ocurra finalmente dependerá de lo que hemos llamado selección fundamental. Es un tipo de selección impuesta por leyes tan fundamentales y universales como la gravitación, la conducción del calor o la propagación de la luz, y del margen de libertad que éstas permiten. Un móvil que no conserve la energía no superará la selección para acceder a la realidad, no será nunca un proceso real.

Otro ejemplo claro de selección fundamental: los cuerpos celestes, a partir de cierto tamaño, son en su gran mayoría esféricos porque la uniformidad y la isotropía del espacio (ausencia de posiciones y direcciones especialmente privilegiadas) y el carácter central de las fuerzas dominantes seleccionan (favorecen) esta forma por delante de cualquier otra. Si en lugar de situarnos en el isótropo espacio interestelar lo hacemos en la verticalidad del campo gravitatorio sobre la superficie de un planeta como la Tierra, la selección fundamental deja de favorecer formas como la esfera. Pero sigue favoreciendo la máxima simetría circular compatible con las nuevas condiciones. Localmente, la dirección vertical (central respecto de la bola del planeta) rompe la isotropía. Es una dirección de privilegio. La luz solar también contribuye a romper la isotropía: la luz no procede de todas partes por igual, procede de la posición en la que se encuentra el Sol. La uniformidad del espacio también se ha roto. No es lo mismo estar en la cima de una montaña, en la orilla de un río o en el fondo del mar. Son entornos de distinta incertidumbre. La violencia de las tormentas de aire, agua y electricidad en la cima no puede compararse con la suavidad de la incertidumbre en ciertas zonas del valle ni con la espesa calma en el fondo del océano. Ahora, además de las fuerzas gravitatorias, intervendrán otros fenómenos fundamentales importantes, como los cambios térmicos, la erosión y reacción química con agentes tan inciertos como el aire y el agua, o las colisiones con otros objetos sólidos. Por ejemplo, los estratos rocosos que asoman en las montañas debido a la erosión suelen aparecer como típicas hileras horizontales de rocas pseudocúbicas. La selección fundamental no favorece cualquier forma. Los pseudocubos son el resultado de una primera sucesión de *selecciones fundamentales* donde aún pueden reconocerse la horizontalidad de un mar ancestral y la verticalidad de las fracturas por compresión, debidas a los fuertes cambios

de temperatura. Estas rocas acaban desprendiéndose y ruedan cuesta abajo hacia espacios de diferente incertidumbre. Arrastradas por riadas más o menos violentas, los objetos se ven sometidos a fenómenos nuevos como la abrasión y la meteorización. Ahora chocan unos contra otros, así que, en el valle, cerca de las orillas del río, la selección fundamental filtra, favorece la presencia de rocas más pequeñas y redondeadas, tanto que ya merecen otro nombre, como piedras o, mejor, cantos rodados. Esta clase de incertidumbre puede prolongarse en los nuevos espacios río abajo hasta el punto de afectar seriamente a una propiedad de los objetos como es el tamaño. La selección fundamental puede favorecer entonces tamaños muy pequeños, tanto que hará falta inventar nuevas palabras para designar los objetos, como guijarro, grano de arena o partícula de polvo... Objetos que descansan en el fondo del mar listos para reanudar el larguísimo ciclo de las rocas sedimentarias o que vuelan por las altas capas de la atmósfera a la espera de nuevas incertidumbres. A una propiedad que se consolida en la realidad gracias a la selección fundamental podemos calificarla de propiedad fundamental. Es la forma esférica de los planetas, el tamaño minúsculo de una partícula de polvo o la peculiar estructura del granito. Se puede decir, en suma, que la selección fundamental regula, mediante las leyes y el margen de azar que aquéllas permiten, el grado de necesidad para que un objeto exista con las propiedades que se observan en la realidad. La esfericidad, por ejemplo, es una necesidad mayor para un planeta que para un canto rodado. La *necesidad* tiene, por tanto, grados, según sea la dosis de azar que permitan las leyes, y es el resultado de la selección fundamental. Se diría entonces que en algún sentido la selección fundamental conduce la evolución de los objetos inertes (no vivos, no cultos). Una estrella apartada de su forma esférica por una fuerza imaginaria y colosal tornaría a ella al ser de nuevo abandonada a su suerte, es decir, a la especial combinación de leyes y contingencia que caracteriza la realidad en la que está inmersa. Y tal cosa ocurre por selección fundamental. Es la forma con la que puede resistir ulteriores fluctuaciones, es la forma estable. La selección fundamental premia una propiedad, la esfericidad en este caso, que permite resistir, que confiere estabilidad. Se trata de una especie de plusvalía por haber superado una selección. Alto. Esta idea merece una generalización.

Cualquier propiedad de un objeto o suceso que supera una selección adquiere una ventaja que le permite perseverar en la realidad, esto es, que le permite seguir existiendo. Necesitamos una palabra para nombrar esta ventaja o plusvalía. Y elegimos el término de «función». Diremos ahora que la función de la esfericidad de las estrellas es su propia estabilidad como objeto. Un grano de arena vieja se distingue de un grano de arena joven porque es más esférico. Un grano joven, que todavía no es redondo del todo, aún puede envejecer completando su redondez. La forma redonda es aquí el síntoma de haber llegado, la señal del fin del tiempo, de la estabilidad. Es la forma que resulta de la selección fundamental, del efecto de las muchas abrasiones, arrastres y colisiones que sufre este objeto en su historia particular. Llamemos a esta clase de función, la que resulta de la selección fundamental, «función fundamental». La función fundamental afecta a la distribución de los objetos en la naturaleza. Los objetos lógicamente equiprobables dejan de serlo si se precisa a qué realidad concreta deben acceder. Las estrellas son casi todas esféricas. Es una fuerte intuición: conocer las funciones fundamentales de lo real tiene que ver con la comprensión de la realidad.

Usar el término función para la materia inerte puede sonar extraño. La palabra función, en el lenguaje corriente, no se libra nunca del sentido de intención, de objetivo o, como mínimo, de utilidad para algo. Este último sentido nos sirve aquí. Pero, como se puede adivinar, se trata de ampliar el significado del término función por una cuestión de coherencia de lenguaje. Ya llegamos. Introducimos ahora las ideas de *función natural* y *función culta*.

Consideremos un objeto típico de la materia viva. Ahora, existir significa mantener viva una identidad viva, lo que supone, además, superar otro tipo de selección, la selección *natural*. Un ser no vivo sigue mansamente los caprichos de la incertidumbre de su entorno. La temperatura de una piedra fluctúa, con mayor o menor inercia, al compás de las fluctuaciones de la temperatura ambiental. La piedra resiste. Resistirá más o menos según su masa y su capacidad calorífica. El grado de resistencia está determinado de antemano. Poco más puede hacer una piedra para no seguir a merced de los caprichos de su entorno. Ciertos individuos vivos, en cambio, tienden a mantener su identidad independiente de tales caprichos. La temperatura de un ratón fluctúa

mucho menos que la temperatura de su ambiente. Toda innovación emergente en un individuo vivo que favorezca la independencia de una individualidad viva (la misma u otra) respecto de su incertidumbre tiende a aprobar una nueva clase de examen, el de la selección natural.

La selección natural queda así incluida de manera natural en un esquema conceptual más amplio. La regulación de la temperatura corporal de los mamíferos es una manifestación de esa independencia viva. Es una capacidad favorecida por la selección natural, es *una función natural*. Ahora no se trata simplemente de resistir las variaciones externas de temperatura, se trata de percibir las fluctuaciones externas y reaccionar, modificar lo que haya que modificar para perseverar. Se puede hacer de forma simple y tosca o de una manera compleja y sofisticada. Un reptil modifica el entorno cambiando de entorno, es decir, poniéndose al sol. Es más independiente que una planta o una piedra, que ni siquiera tienen la capacidad de moverse. Pero es menos independiente que un mamífero, que disfruta de una termorregulación autónoma y no necesita tomar el sol para cargar baterías o reducir su actividad si no hay sol que tomar. El aire acondicionado vendría a continuación, pero no adelantemos acontecimientos. Volveremos sobre este tema para proponer una visión más extensa e intensa de cómo los objetos vivos pueden escalar la complejidad bajo la presión del motor más importante de la evolución: la incertidumbre del entorno. En el mundo de lo vivo, la selección natural acentúa la presencia de ciertas propiedades, distorsionando, a veces fuertemente, las prestaciones propias de la selección fundamental. Atención, porque nos acabamos de tropezar con una radical novedad en la historia del universo, la *función natural*. Simétricamente: sólo por pasar el filtro de la selección natural, una innovación queda adornada con una función, que no es sino el detalle por el cual el individuo vivo mejora su disposición para defender la independencia (o ganar nueva independencia) de cierta nueva (o no) individualidad viva. Cualquier innovación favorecida por la selección natural constituye una función natural. La selección natural conduce la evolución de los seres vivos y lo que en el mundo inerte era seguir estando, en el mundo vivo es seguir vivo. Lo que en el mundo inerte era estabilidad, en el mundo vivo es adaptabilidad o capacidad de evolución. El mundo vivo está repleto de casos que nos servirán de ilustración. Veamos alguno.

La universalidad del concepto huevo

Un objeto muy frecuente en el mundo vivo es el huevo. Es omnipresente en el reino animal. Todos los animales descienden de esta prestigiosa célula. La selección fundamental en las condiciones de isotropía de las aguas primitivas favoreció, por ejemplo, la forma esférica. La esfera triunfó espectacularmente como una forma idónea para el concepto «huevo». La selección fundamental es generosa con la esfera, de modo que la selección natural no tuvo más que firmar una forma espontánea que ya de por sí era razonablemente frecuente. Pero ¿por qué había de firmar?, ¿qué ventajas puede tener una esfera para el porvenir del concepto huevo? Bien, no es difícil dar con algunas. En primer lugar, la esfera es la mínima superficie que encierra un volumen determinado, la esfera minimiza la relación entre un volumen y la cantidad de su superficie frontera con el exterior. Es lo contrario de lo que se propone un radiador diseñado para calentar una habitación. Los huevos esféricos pierden lentamente el calor que se produce en su interior (en realidad, la gallina cuando incuba hace de manta, es decir, evita que el huevo se enfríe, pero no lo calienta, el calor fluye del huevo hacia la gallina, o sea, ¡es el huevo el que calienta a la gallina!). Además, la forma esférica también dificulta un ataque a mordiscos por unas fauces cuyo diámetro no sea mucho mayor que el de la esfera. Quizá se pueda arriesgar esta afirmación: las esferas vivas *protegen.* Protegen como mínimo contra el enfriamiento y la depredación, pero la idea puede extenderse mentalmente a otras muchas situaciones similares. Proteger, he aquí la presunta función de ciertas esferas de ciertos objetos vivos en ciertos ambientes. La selección natural suele aumentar la presencia de esferas en el mundo vivo por esta función. Sin embargo, la incertidumbre ambiental puede seguir promocionando nuevas selecciones naturales y, con ellas, nuevas funciones. Cuando los animales conquistan tierra firme, cambia la nervura de lo real. La esfera se enfrenta entonces, súbitamente, a una desventaja (una función negativa, podríamos decir): rodar. Las esferas, sí, resulta que ruedan con mucha facilidad sobre un plano porque entre ambas formas —el plano y la esfera— sólo existe un punto de contacto. La selección natural pudo muy bien bendecir el tránsito desde la esfera a una forma más ovoide. Las direcciones de escape peligrosas pasan de ser infinitas (cualquier dirección)

a ser sólo una (perpendicular al eje de simetría del ovoide). Otros factores, como la facilidad con la que el huevo sale del cuerpo de la hembra, pueden haber presionado en el mismo sentido. De este modo, la forma ovoide pudo adquirir más de una función... He aquí un caso en el que la selección natural confirma con creces la evolución fundamental. Así pues, cada golpe de cincel de la selección natural *distorsiona* la frecuencia de la presencia de una o varias propiedades de los objetos vivos y los dota de nuevas funciones, funciones que contribuyen a la inteligibilidad de la realidad.

En ocasiones, un cambio en la incertidumbre ambiental descubre una función en una antigua novedad que la selección natural había favorecido en pro de otra función distinta. Es la actualización de una función oculta. Es la selección natural confirmando otra selección natural. Es la selección natural definiendo funciones. Es, por ejemplo, el caso espectacular del concepto «pluma», que emerge con la función de proteger térmicamente y que, millones de años después, resulta que se consolida por otra función tanto o más trascendente: la capacidad de volar. Es también el caso de los pulmones de los peces primitivos reconvertidos en vejigas natatorias. Cuando las aguas se enriquecen en oxígeno ya no hace falta sacar la cabeza fuera del agua para respirar el oxígeno aéreo. Entonces la función «respiración» se sustituye, con algún retoque, por la función «flotabilidad neutra» para nadar gastando menos energía. Un golpe de selección puede proveer más de una función. Pero también ocurre a veces que la misma función, volar por ejemplo, puede asomarse en la evolución como consecuencia de dos golpes de selección diferentes. Las plumas no son imprescindibles para volar, como bien saben los murciélagos, ciertos insectos, ciertas semillas... Incluso es posible que la selección natural apruebe soluciones similares en objetos muy diferentes para resolver incertidumbres parecidas (convergencia). Es el caso de la forma de los delfines (mamíferos) y los atunes (peces). O el ojo tipo cámara del pulpo (molusco), una estructura *reinventada* (reseleccionada) decenas de veces a lo largo de la evolución en géneros muy distantes de animales. Los últimos avances en genética han puesto de relieve que algunas de estas convergencias no son tales en verdad, sino que la selección natural ha favorecido un solo gen capaz de despertar con parecidas funciones en especies muy distintas con soluciones diferentes. Es el caso de los famosos

genes *Hox*. De cualquier modo, algo está fuera de toda duda: la íntima relación entre dos conceptos, el de función y el de selección. Y tal cosa ocurre en las dos clases de selección tratadas hasta ahora, la fundamental y la natural. Pero no hemos acabado. Queda, por lo menos, un tercer tipo de función, la función artificial o culta.

La selección fundamental actúa desde el preciso momento en que surge la materia inerte; la selección natural, inmediatamente después de que de ella surgiera el primer ser vivo y, por último, la tercera y última clase de selección, la selección cultural, justo después de que cierto ser vivo accediera a un nivel de inteligencia capaz de anticiparse a la incertidumbre de su entorno mediante el conocimiento abstracto. La selección cultural no contradice la selección fundamental ni la natural, pero sí puede burlarlas. Ahora no se trata de resistir ni de modificar. Ahora se trata de anticipar. Antes de la emergencia de la materia viva, sólo se veían volar objetos más densos que el aire cuando éstos eran muy ligeros, como partículas de ceniza o polvo. Una piedra rebotada de una avalancha o un meteorito procedente del cosmos son sucesos nada frecuentes en términos del tiempo que dura su ocurrencia. Es muy difícil que salgan en la foto de la realidad. La selección natural distorsiona de forma definitiva esta posibilidad cuando el cielo se ve, un día, surcado de objetos más densos que el aire, como insectos, reptiles y pájaros. Fue un logro de la selección natural. Pero, desde luego, nada comparable con la posibilidad de contemplar un Boeing 747 o el añorado *Concorde* cruzando el Atlántico a miles de metros de altura. Las piezas de estos artefactos y su compleja relación mutua son el resultado de la selección cultural. Cada una de las piezas del avión tiene una función culta y el conjunto de todas ellas tiene la particular función de volar.

Si el resultado de la selección fundamental es la *función fundamental* y el resultado de la selección natural es la *función natural*, el resultado de la selección cultural es lo que ya nos hemos adelantado en bautizar como la *función culta*. La selección cultural introduce una novedad radical en la historia de la materia. Si la selección fundamental y la selección natural se *encuentran* con las funciones, la cultural, además, las *busca*.

Con la selección cultural los problemas preceden a sus soluciones. Con la selección natural ocurre lo contrario, primero aparecen las solu-

ciones y, con el tiempo, algún problema que aquéllas puedan resolver. La selección natural favorece al seleccionado, la selección artificial favorece al seleccionador.

Con la selección cultural emergen nuevos conceptos en la historia de la realidad, todos ellos relacionados con la anticipación de la incertidumbre, todos ellos rigurosa y radicalmente ausentes en los contextos de las selecciones fundamental y natural. Por eso es un abuso del lenguaje emplear expresiones como «la selección natural inventó la pluma» o «los insectos palo se quedan inmóviles para evitar ser vistos por los depredadores». Si se movieran serían descubiertos con más facilidad, sin duda. Pero también es verdad que no se quedan inmóviles con esta *intención*. Digamos, sencillamente, que los que se movían no han perseverado lo suficiente en la realidad para contarlo (con perdón por el nuevo abuso de lenguaje). Toleramos estos abusos de lenguaje por lo retorcido que resultaría soportar las expresiones correctas y por lo tedioso que resultaría andar disculpándose cada vez por la metáfora. Pero conceptos como proyecto, diseño, plan, intención, objetivo o teleología son innovaciones radicales que emergen simultáneamente con la selección cultural, pero nunca antes. Aventuramos una máxima.

Crear es seleccionar... ¿qué si no?

En rigor (aunque no hace falta empeñar demasiado rigor para ello), crear es seleccionar. Hemos citado el dato hace unas páginas: una partida real de ajedrez (una partida jugada alguna vez) es una partida entre 10^{120} (un uno seguido de ciento veinte ceros). En rigor, todas las partidas jugables de ajedrez están escritas en alguna parte. Sin embargo, no hay que llegar tan lejos. Un jugador de ajedrez piensa para seleccionar cuál es su próxima jugada. Para él crear es seleccionar. Entre las enormidades también hay clases. Los poetas parecen tenerlo un poco mejor en cuanto a libertad de creación. El número de sonetos libres distintos que se pueden llegar a componer es 10^{415} (un uno seguido de 415 ceros). Es un número tan grande que se queda sin adjetivos. Ni la totalidad del cosmos sirve de inspiración. El número cuenta las distintas alternativas que hay en un idioma con unas 85.000 palabras en su diccionario (como el español) para ordenar seis palabras en cada uno

de los 14 versos. La inmensa mayoría de esos sonetos no tienen, claro, el menor sentido. Y de la inmensa minoría de los versos que sí tienen sentido, una inmensa mayoría serán malísimos. De modo que sólo una inmensa minoría, aún inmensa, de aquella minoría, merecen editor. Ahora bien, ni todos los seres humanos que quedan por nacer, metidos todos a genios del soneto con furia creadora de veinticuatro horas al día, serían suficientes para escribir una minúscula parte del número de poemas geniales posibles, todavía no escritos. Salvados por la enormidad. Quevedo quizá no llegara a saberlo, ni falta que le hacía, pero sus sonetos ya estaban escritos en el mundo de lo realizable pero aún no realizado. Se pueden escribir $10^{354.918}$ novelas de 200 páginas a 360 palabras por página. No hay comentario posible para este número. Crear quizá sea una ilusión, pero es una ilusión tenaz, y desde luego implica el concepto de selección cultural.

Seleccionar es lo que hace un jugador de ajedrez cuando mueve una pieza, es lo que hace un poeta cuando escribe, es lo que hace un escultor cuando esculpe... ¡y es lo que hace un científico cuando hace ciencia! Aquí se cierra un interesante círculo virtuoso. Comprender también pasa por seleccionar. Llegamos así al segundo concepto tratado en este capítulo, la comprensión. En particular, ¿qué es comprender en ciencia?

Si no existe algún tipo de selección, todos los objetos y todos los sucesos son igualmente probables. En tal caso no hay nada que comprender. La selección es un artefacto para romper equiprobabilidades. En general, al científico se le despierta el olfato cuando percibe que algo se aparta de la equiprobabilidad, cuando descubre que algo se repite en la naturaleza, cuando observa cosas comunes en objetos o fenómenos diferentes. Es entonces cuando anuncia una nueva comprensión científica. Ocurre cuando existen condiciones que cumplir, cuando, oculta o no, resulta que actúa algún tipo de restricción, cuando hay selección. Entonces nombramos esta situación con cierta solemnidad, decimos que existe ley, conocimiento, inteligibilidad...

Empecemos la discusión con un ejemplo. Escojamos un rincón de la realidad, una playa fluvial. Consideremos los objetos que vemos en ella, los cantos rodados. Y atendamos tan sólo a una de sus propiedades. Por ejemplo, la *forma*. En principio, se observa una notable diversidad de formas. Hay simetrías circulares, esféricas, triángulos, elip-

soides... pero atención, la distribución de todas estas formas no es en absoluto equiprobable. Predomina, con mucho, la simetría circular, a mucha distancia aparecen los triángulos... Las formas no son equiprobables. La distribución de la variedad de formas de las piedras quizá tenga *forma* a su vez. Hay algo que comprender. Huele a nuevo conocimiento. La existencia de una *teoría de la forma* no parece un sueño descabellado.

Démonos ahora un paseo por el mundo vivo. Supongamos una selva tropical. Démonos otra vuelta también por un espacio habitado por materia culta. Supongamos una ciudad. Enseguida nos convenceremos de que, en efecto, las probabilidades de emergencia de las formas no son las mismas. Ahora constatamos (seguimos atendiendo a la forma de los objetos) que, en los nuevos paisajes elegidos, en la selva y en la ciudad, la distribución de formas se ha alejado aún más de la uniformidad. Ciertos objetos con forma de hélice, por ejemplo, son mucho más frecuentes en una selva que en un paisaje típicamente inerte. Y, aunque en principio no tenía por qué ser así, resulta que las hélices aún se prodigan con mayor insistencia en un ambiente urbano. Esto significa que las plusvalías (lo que se gana con) de las distintas selecciones (fundamental, natural y cultural) también han sido distintas. Esto significa que las funciones adquiridas son distintas o iguales pero de diversa intensidad. ¿Qué funciones? Por lo menos ya tenemos algo que buscar, ya tenemos algo que comprender, ya sabemos lo que queremos saber...

La hélice es una forma definitivamente trascendente en selvas y ciudades. Basta un sencillo y breve experimento mental: si eliminamos de un plumazo todas las trepadoras, zarcillos, colas, trompas... (hélices vivas) de una selva, ésta se vendrá abajo con estrépito. Y con no menos estrépito se derrumbará una ciudad si la privamos de repente de todos los tornillos, cables y cuerdas previstos en sus múltiples estructuras (hélices inteligentes). La hélice *agarra*. La hélice es una forma frecuente a menudo favorecida por su función de anclaje seguro y fuerte. Un remolino de agua o un tornado son hélices espontáneas. Su función no parece clara, pero un zarcillo, una semilla con un refinado mecanismo que la hace caer en hélice cuando se desprende, una trompa de elefante, el trenzado de una cuerda o un simple tornillo comparten la función de agarrar. La presencia de la hélice en la realidad se empieza

a comprender a través de la función de agarrar... Un conocimiento sobre la emergencia de las formas en la naturaleza podría empezar muy bien con la relación entre forma y función. Probemos: la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, la parábola emite y recibe, la onda desplaza, la punta penetra, la catenaria aguanta, los fractales colonizan el espacio con continuidad...

Así se puede esbozar una panorámica de la realidad entera y de nuestra pretensión de comprenderla. La selección natural es un logro de la selección fundamental y la selección artificial un logro de la selección natural. Superar selecciones fundamentales significa estabilidad, opciones para permanecer en la realidad. Superar selecciones naturales proporciona funciones, opciones para seguir vivo. E inventar selecciones culturales, ya sea en forma de leyes, mecanismos, historias o grandes esquemas conceptuales, significa crear conocimiento, opciones para aumentar nuestra independencia respecto de la incertidumbre.

Supongamos que centramos nuestro interés en comprender la forma de los objetos reales. Las tres clases de selección (procedentes de las tres clases de umbrales posibles de existencia) y el esquema conceptual que se construye sobre éstas quizá puedan ayudar. Por un lado, las tres clases de selección inducen directamente una primera clasificación de la forma de los objetos. Por otro lado, las tres selecciones abren todo un panorama de sus funciones asociadas. Tal es el plan de investigación, buscar las funciones y ordenarlas por su trascendencia, es decir, por su frecuencia relativa en la realidad. Nuestro concepto de función, entendido como una ventaja ganada a favor de la estabilidad, de la adaptabilidad o del gozo mental es crucial a la hora de comprender el mundo. A ello nos dedicaremos en la segunda parte del libro.

La idea central del plan de investigación que proponemos para comprender el mundo culmina entonces con una colección de funciones. Y ello, a su vez, pasa por explorar la(s) selección(es) y sus respectivas alternativas cada vez que se presenta la oportunidad de elegir. En el mundo inerte, el buen conocimiento acumulado en las ciencias experimentales supone una buena ayuda para afrentar las alternativas de la selección fundamental y la incertidumbre reinante. En el mundo vivo, la biología nos brinda hoy una lista colosal de conocimientos sobre mecanismos, esbozos de teorías generales, grandes ideas de grandes pensadores de la evolución, potentes herramientas de simulación y de

cálculo. Ahora bien, ¿cómo ordenar todo ello a la hora de hacer apuestas sobre la selección natural y la función natural? El próximo capítulo se ocupa de ello. Pero hablar de estas cuestiones requiere usar términos como ser vivo, seguir vivo, progreso, selección natural... Todo nuevo esquema conceptual necesita supervisar la entrada de nuevas palabras y revisar el significado de las antiguas. También nos ocupamos de ello en las páginas que siguen.

7
La ley general del cambio
pese a la insistencia de lo real en seguir siéndolo

Perseverar, en el mundo inerte, significa seguir estando; en el mundo vivo significa seguir vivo; y en el mundo culto significa seguir conociendo. Cada vez que la incertidumbre del entorno fluctúa, se replantea la cuestión. Entonces la selección —fundamental, natural o cultural— actúa sobre individualidades que ganan nuevas funciones en favor de seguir estando, seguir viviendo o seguir conociendo. Los objetos inertes no tienen estímulos que les empujen a seguir. Pero cualquier cambio, cualquier fenómeno, requiere energía y riesgo. La selección natural, en cambio, suele consolidar estímulos del tipo placer-dolor que vencen la pereza de gastar energía o el miedo a ponerse en peligro. Pero ¿entre qué alternativas se produce la selección? El ajedrecista dispone de la memoria y de su capacidad de anticipación para proceder por selección cultural a la hora de seleccionar cada jugada. La panorámica de opciones da para hablar de táctica y de estrategia. En el mundo inerte la selección fundamental se define en las bifurcaciones inestables donde se cruzan los caminos de lo posible. El funcionamiento de dos de estas clases de selección, la fundamental y la culta, satisface directamente nuestra intuición y nuestra comprensión. Las alternativas en el mundo inerte se leen en las soluciones de las leyes vigentes. Las alternativas en la selección cultural dependen de la creatividad de la mente. Pero ¿qué se puede decir del mapa de alternativas en el mundo vivo? ¿Dónde encuentra la selección natural su campo propio de opciones? ¿Cómo seguir vivo cuando la incertidumbre aprieta?

Empecemos con el concepto de ser vivo. ¿Qué es un ser vivo? Una definición muy amplia, pero suficiente para arrancar, es la que coincide con la ya propuesta para la noción de individualidad:

Un ser vivo es un objeto que tiende a mantener una identidad independiente de la incertidumbre de su entorno.

Aquí equiparamos la idea de ser vivo a la de individuo, donde un individuo es una individualidad viva. La calidad de vivo se gana en cuanto la palabra «tendencia» incluye la facultad de modificar el correspondiente entorno. Un cristal de cloruro sódico es una individualidad en determinados ambientes, allí donde resiste ciertas variaciones del entorno sin perder la identidad propia de esta sal. Pero si el entorno cambia demasiado (si aumenta demasiado la humedad), el cristal se disuelve. Es decir, ¡no es capaz de cambiar la humedad de su entorno para seguir siendo un cristal de sal! Resiste, pero no modifica. Es una individualidad pero no un individuo. El salto de la individualidad al individuo, de lo inerte a lo vivo, se produce cuando la independencia del entorno se consigue estableciendo un diálogo entre el objeto y la incertidumbre en la que está inmerso.

La idea del ser vivo como una individualidad es una de las tres claves de la definición que acabamos de proponer. El significado del sujeto de la definición, el *ser* vivo, es el de la individualidad introducida en el esquema conceptual. El ser vivo no es una parte cualquiera o una simple colección de otros individuos vivos. Ello no descarta, claro, que la asociación de dos o más individuos pueda llegar a dar lugar a la emergencia de un nuevo individuo vivo. Como veremos, crear una nueva identidad, aunque sea en otro orden jerárquico es, de hecho, un buen recurso para perpetuar la calidad de *vivo*.

La segunda clave está en que la relación del individuo con su entorno no se centra en la idea de adaptación sino en la idea de *independencia*, un término que tiene un nítido significado a la hora de hablar de la estabilidad de un sistema y de sus eventuales interacciones con su mundo exterior. Un pedazo de materia inerte, por ejemplo, se calienta tranquilamente cuando en su entorno inmediato aumenta la temperatura. Se adapta. Un ser vivo, en cambio, tiende a reorganizarse para que su temperatura se mantenga como si en el entorno no hubiera ocurrido nada. Cambia para que nada cambie. La clave *independencia* proporciona a la clave *individuo* su verdadero sentido.

Pero la tercera clave es quizá la clave de las claves: consiste en elegir la *incertidumbre* como la medida relevante del entorno. Lo esencial

no es atender y responder a unas fluctuaciones concretas y determinadas del entorno, sino tener la elasticidad para encajar las fluctuaciones de un entorno en principio caprichoso e imprevisible. Resulta fácil inventar una máquina que anule los efectos de unas perturbaciones conocidas de antemano, pero resulta muy difícil construir una máquina que se defienda de la incertidumbre. Con esta definición ganan sentido otros conceptos que han caído en desgracia en biología. Por ejemplo, nos regala un significado para la palabra progreso que tanto venimos anunciando aquí: [39]

Un individuo progresa en un entorno si gana independencia con respecto al mismo.

Para ser más explícitos: un individuo pasa de un estado A a un estado B, tal que B es más progresivo que A, si el estado B es más independiente de la incertidumbre del entorno que A. El concepto es nuevo y ahora se trata de ver si, con esta definición, la palabra es capaz de recuperar el prestigio perdido en ciencia con las contradicciones y ambigüedades de las anteriores definiciones. También se trata de poner la idea a prueba para ver si con ella se consigue un nuevo enfoque de la evolución de las formas vivas. Tenemos por delante una cuestión crucial: conocer (comprender) las alternativas que le quedan a un individuo vivo cuando resulta que la incertidumbre de su entorno aumenta. Empecemos por esta última situación: ¿cómo dibujar un panorama de las alternativas disponibles? ¿Cómo integrar nuestros actuales conocimientos en física, química y biología para trazar un mapa de las alternativas para seguir vivo?

En el año 2000 propuse un intento de respuesta en la revista *Biology and Philosophy* [40] que despertó cierto interés [41] y [42]. Se trata de una síntesis en forma de identidad matemática que procede de un especial engarce entre la termodinámica del no equilibrio (intercambio de materia y energía del individuo con el entorno) y de la teoría matemática de la información (intercambio de información con el entorno). Se trata de una relación inviolable entre cuatro conceptos trascendentes de la relación de un objeto con su entorno. La llamaremos *ley general del cambio,* y en palabras suena así:

La complejidad de un individuo más su capacidad de anticipación respecto del entorno es igual a la incertidumbre del entorno más la capacidad del individuo para cambiar el (o de) entorno.

Se puede proponer, como veremos, una generalización que va más allá de los propios seres vivos en los que se ha inspirado su deducción y propuesta. Analicemos de momento, uno a uno, los cuatro conceptos.

La *complejidad* mide la variabilidad de estados accesibles al individuo vivo. Es una expresión de su identidad. Si, por ejemplo, hablamos de la propiedad color, el término será casi nulo para un oso polar (cien por cien de un solo color), ligeramente mayor para un zorro ártico (blanco en invierno y oscuro en verano) y mucho más grande para un lenguado o un pulpo (capaz de cambiar de color según las circunstancias). En cambio, la complejidad será máxima si los colores están repartidos por igual entre n diferentes posibilidades. La complejidad, como cualquiera de las otras tres magnitudes, se mide en unidades de información (bits, por ejemplo) como la masa se mide en kilogramos.

La *incertidumbre* es la complejidad del entorno. Es decir: expresa la variabilidad de estados accesibles al entorno. Si seguimos hablando de la propiedad color como ejemplo, el término será casi nulo para un paisaje ártico y bastante mayor para un jardín botánico en flor. Si en cambio hablamos de estados atmosféricos posibles, entonces será mayor la incertidumbre de una selva tropical que la del fondo de una fosa marina donde la luz ambiental no existe (oscuridad total cierta y permanente) y donde la temperatura apenas cambia unas centésimas de grado a lo largo de todo el año. Es un término imprescindible a la hora de hablar de un ser vivo y da cuenta directamente de la caprichosidad de las fluctuaciones ambientales. Yo diría incluso que la incertidumbre del entorno es parte inseparable de un ser vivo. No tiene demasiado sentido comparar dos seres vivos entre sí prescindiendo de cuáles son sus entornos. Obsérvese que con ello la idea coloquial de incertidumbre, como sinónimo de azar, caos o ignorancia, adquiere aquí un sentido bien claro, medible y objetivo. Tanto, claro, como cualquiera de los otros términos de la identidad.

La *capacidad de anticipación* de un ser vivo expresa la variabilidad de los estados accesibles (o complejidad) de un individuo vivo, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles del entorno. Se trata,

pues, de un interesante término cruzado entre el sistema y su entorno. La capacidad de anticipación de una lombriz, que sólo detecta ciertos cambios groseros de humedad o de luz ambiental, es pequeña. La capacidad de anticipación de la torre de control de un aeropuerto, en cambio, es grande. El sistema inmunológico, la inteligencia y el propio conocimiento científico son claros logros de la evolución para ganar anticipación.

La *capacidad de cambiar el (o de) entorno* expresa la variabilidad de estados accesibles del entorno, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles del individuo. Es por tanto otro interesante término cruzado, el término cruzado simétrico. Puede tener el sentido directo de *impacto ambiental,* muy pequeño en el caso de un inmenso desierto transitado por un solitario beduino o muy grande si se trata de la afluencia masiva de bañistas a una pequeña playa. Pero también expresa, y es el quid de la cuestión, la manera accesible al ser vivo para introducir modificaciones en su entorno. En esencia hay dos modos: la tecnología (cambiar *el* entorno) o la movilidad (cambiar *de* entorno).

La ley general del cambio es una identidad matemática (no confundir con la identidad de un objeto o de un individuo, concepto representado, justamente, por el primer término de la identidad matemática). Una ecuación sólo se cumple para unos valores de las variables que llamamos soluciones. En cambio, una identidad se cumple para todo valor de las variables. Por ello es inviolable e insoslayable. Si resulta que la incertidumbre del entorno de un individuo aumenta, entonces se abren tres grandes alternativas para seguir vivo: mejorar la anticipación, la movilidad y/o la tecnología. Se trata, atención, de una restricción. No esconde ninguna clase de obligación. Precisamente hay muchas soluciones compatibles con la restricción determinada por la ley general del cambio. Entre las soluciones posibles (entre las soluciones que no contradicen la ley), hay donde elegir. Por ello tiene sentido hablar de selección. Nos estamos ocupando de seres vivos y, por lo tanto, de la selección natural que favorece la idea de seguir vivo. Adelantemos, sin embargo, que la ley es del todo universal. Nada hay en ella que obligue a restringir su vigencia a los seres vivos. Por lo tanto, nada se opone a generalizar su uso a la selección fundamental que favorece la idea de seguir estando, ni a la selección cultural que favorece la idea de seguir conociendo.

La selección (fundamental, natural o culta) es un filtro que deja pasar las innovaciones que favorecen la independencia de alguna clase de individualidad respecto de la incertidumbre del resto del mundo.

He aquí, por el mismo precio, otra interesante manera de mentar el concepto de función. El significado profundo de esa propiedad de los objetos llamada función contiene las garantías de independencia para perseverar en la realidad. La noción de individualidad (y de individuo vivo) que hemos preparado precontiene este significado. No se trata de una circularidad lógica sino de la coherencia entre conceptos de un mismo esquema. Por eso comprender un objeto de la realidad equivale a captar sus funciones, es decir, las garantías de independencia que hacen que se observe tal objeto en la realidad con la precisa frecuencia con la que se le observa. Ésta es la idea central con la que trataremos de comprender la emergencia de las formas en la segunda parte del libro. El concepto de independencia merece también un comentario. Se trata, claro, de la independencia local que corresponde a la particular incertidumbre del momento y del lugar. Hay que percatarse de que en la incertidumbre de un organismo vivo están incluidos los otros organismos vivos. Existe por lo tanto un tiempo corto (de la biología) y un tiempo largo (de la geología). El concepto de «progreso» es siempre a largo plazo y está relacionado con una independencia que maneja tiempos de una jerarquía muy amplia. Por ello, el progreso, de ser visible, lo es en el registro fósil, no en un registro fresco como el de una selva viva o un jardín botánico o zoológico.

El propio esquema conceptual brinda la generalización de lo natural a lo inerte y lo culto. Las diferentes estrategias para seguir vivo deducibles de la ley general del cambio (y que vamos a revisar a continuación) admiten una extensión a cualquier clase de materia. Para ello basta ampliar la idea de «seguir vivo» hasta la idea spinoziana más general de perseverar en la realidad. Ya hemos visto cómo: perseverar en la materia inerte significa resistir la incertidumbre, perseverar en la materia viva significa modificar la incertidumbre, y perseverar en la materia culta significa anticipar la incertidumbre. El significado de individuo también adquiere sus matices en cada materia. En la materia inerte los individuos son ciertos objetos trascendentes y estables (son las par-

tículas, átomos, moléculas, cristales...). En la materia viva los individuos son ciertos objetos de especiales propiedades (son los genes, las células, los organismos, las poblaciones...). Pero quizá sea en la materia culta donde el concepto de individuo es más nítido: la mente. La selección cultural es obra de una mente. La mente es el último sujeto de conocimiento. Pensar, pensar, pensar, piensa una mente. El paso siguiente sería el grupo humano. Con ello entramos sin duda en política. Se puede hablar incluso de una selección más como candidata a nuestro esquema conceptual. En ese caso habría cuatro clases de selección bien distintas: selección fundamental, selección natural, selección cultural y ¡selección social! ¿Cómo se toma una decisión colectiva? Eso es política. En un extremo está la autocracia en sus diferentes versiones: una mente convence al resto de las mentes para que deleguen en ella el acto de seleccionar, luego vienen las distintas formas de participación, las distintas maneras de elaborar una selección colectiva. Entre ellas está la democracia...

Pero sigamos con los seres vivos, cuya gran ilusión es, como bien se sabe, seguir vivos. Con la posibilidad de la generalización en mente, nos disponemos ahora a plantear la cuestión central de la evolución en el caso de la materia viva. Se trata de estudiar las alternativas disponibles que tiene un ser vivo para perseverar cuando la incertidumbre de su entorno aumenta. Sobrevolemos, aunque sea rápidamente, tres grandes familias de soluciones. Son la *independencia pasiva*, la *independencia activa* y la *nueva independencia*. Se trata de ver lo que da de sí la ley general del cambio en el caso de la materia viva. La extensión de lo que sigue a la materia inerte es casi trivial. La extensión de lo que sigue a la materia culta da sin duda para otro libro.

Independencia pasiva

La manera trivial de ser independiente consiste en aislarse. Si no se intercambia nada con el exterior (materia, energía o información), el exterior no influye en el interior, y viceversa. Sólo que para un ser vivo tal cosa no es en principio demasiado interesante, porque el único estado termodinámico compatible con el aislamiento es el equilibrio termodinámico, el estado donde ya ha ocurrido todo lo que podía ocurrir.

En términos biológicos: la muerte. Sin embargo, la vida aprovecha aproximaciones de riesgo cerca del estado que la niega.

Un caso es la independencia pasiva por *simplificación*. Consiste en reducir la actividad interior casi a cero. En condiciones muy especiales de baja complejidad, tal cosa puede ser soportable. Es el caso de *sistemas* provisionalmente lo bastante simples, como las semillas, esporas y otras formas resistentes, que pueden esperar inactivos la llegada de tiempos mejores. También es el caso de sistemas no tan simples, pero que renuncian a buena parte de su *actividad* a la espera de una mejora de las condiciones del entorno, como la hibernación, la latencia o el letargo...

El segundo caso es la independencia pasiva por *aislamiento*. Aquí, al anularse el intercambio, la identidad del sistema queda a merced de su propia actividad interna, algo que, al menos parcialmente, puede no ser nada grave. Es el *abrigo*, una manera eficaz de protegerse de ciertas fluctuaciones ambientales más bien previsibles (el pelo invernal, la protección de un nido, de un caparazón blindado...). La otra manera de minimizar el efecto del intercambio con el exterior es reducir su efecto local, es decir, en lugar de anular su valor absoluto se reduce su valor relativo a la unidad de masa. Es la *inercia*. Una manera eficaz de amortiguar las fluctuaciones del exterior, si el aislamiento es difícil, consiste sencillamente en aumentar de *tamaño*, crecer y ser grande (respecto de las fluctuaciones de temperatura: un vaso de agua o un ratón sufren más la fluctuación de un grado de temperatura que un lago o un caballo y éstos a su vez más que un mar o una ballena; respecto de fluctuaciones del peligro de ser devorado: una ballena depende menos de la incertidumbre del entorno de depredadores que un caballo y éste menos que un ratón). Y, atención, otra manera consiste en alterar la *forma* de la frontera del individuo con el exterior, en particular reducir la relación volumen-superficie (cuando un pájaro extiende sus alas al sol aumenta dicho parámetro para conseguir lo contrario, aprovechar las fluctuaciones exteriores). Si de lo que se trata es de no perder materiales, calor u otra forma de energía, lo más eficaz es adoptar la forma que suponga la mínima superficie posible. Es la esfera, el concepto contrario al concepto de radiador de calefacción (en temas de calor) o al concepto «toalla» (en temas de llevarse el agua). El instinto universal de un animal que tiene frío le hace acurrucarse, donde acurrucarse

significa acercarse todo lo posible a la forma de una esfera, la forma que más tiempo retiene el calor interior.

Independencia activa

Una manera no trivial de ser independiente consiste en cambiar todo lo que haya que cambiar de la actividad interna y del intercambio con el exterior para conservar la complejidad de la propia identidad. Representa la vida propiamente dicha de los organismos y requiere un genuino concepto de autoorganización, es decir, percibir las fluctuaciones y actuar en consecuencia. El intercambio de materia, energía e información mantiene al sistema lejos del equilibrio termodinámico. Ahora es la ley general del cambio la que nos orienta sobre las alternativas para seguir vivo. Se trata de mantener la complejidad cuando aumenta la incertidumbre.

Un camino consiste en intentar aumentar la capacidad de anticipación. Cuanto mayor sea esta facultad, más independiente será el ser vivo de la incertidumbre del entorno. Una rata está mejor preparada para amortiguar los caprichos del entorno que una lombriz de tierra. El comportamiento críptico es un modo de independizarse de posibles depredadores y está claro que tal cosa se consigue con una buena información fluyendo entre el individuo y sus alrededores. El sistema nervioso, los órganos de la percepción, el cerebro y las prestaciones de éste, como los distintos grados de inteligencia, siguen ciertas líneas evolutivas que no se explican en virtud de una secuencia de selecciones naturales a favor de la adaptación al medio, sino a favor de una protección contra su incertidumbre. A esta idea se podría objetar, ¡y se objeta!, que no ocurre lo mismo con muchas otras líneas evolutivas, que hay formas estancadas, incluso regresivas. Es verdad, pero la presunta objeción encaja también en nuestro esquema conceptual, porque tales casos ocurren en entornos en los que la incertidumbre disminuye. Y en esas condiciones surge el especialista que, a veces, a cambio de eficacia o bajo coste, opta por la regresión y aumenta su riesgo de ser sorprendido por un capricho de la incertidumbre. No sólo no es un contraejemplo, sino que supone un test suplementario de consistencia del esquema que proponemos. Es lo que ocurre en las profundidades

abisales de los océanos, donde la temperatura apenas fluctúa, donde la luz es constantemente nula (reino vegetal ausente) y donde todo lo que tiene algún interés viene de arriba, «cae del cielo», de las capas superiores. La incertidumbre del entorno es casi nula y sus habitantes pueden instalarse y especializarse en cualquier estrategia compatible. Es lo que ocurre en un bosque sin depredadores con abundancia de un alimento que a pocos apetece, como el eucalipto. La especialización tiene algunas ventajas respecto del intercambio de materia y energía, sobre todo de costo y eficacia. No hay que ir rápido, no hay que competir, no hay que buscar, no hay que proteger... no hay que anticipar. Pero atención, el especialista es sumamente frágil respecto de un entorno poco incierto, cuando ¡ay! éste deja de serlo. De la capacidad de anticipación dependen funciones tales como el sistema inmunitario y la inteligencia.

El otro camino tiene dos vertientes, pues consiste en (uno) mejorar su capacidad para cambiar el entorno (tecnología) o (dos) mejorar el entorno (movilidad). Las herramientas, el dominio del fuego, la agricultura o la ganadería son logros tecnológicos que contribuyen a seguir vivo al ganar independencia. El fuego, por ejemplo, aumentó la diversidad de la dieta en una proporción enorme e independizó a los homínidos de las tres o cuatro cosas tiernas y digeribles accesibles en un momento y lugar. Lo mismo puede decirse de una economía basada en el dinero respecto de otra basada en el trueque. Con el dinero no dependemos de los caprichos del cazador o del recolector para subsistir. El *abrigo*, que antes hemos comentado en su versión pasiva, se convierte aquí en genuina *arquitectura* de nidos, madrigueras y toda clase de impensables refugios y construcciones. La otra vertiente de esta posibilidad es nada menos que la capacidad de un individuo para moverse dentro de su entorno. Cualquier prestación del movimiento puede adquirir un papel decisivo a favor de la independencia del individuo respecto de la incertidumbre. Es curioso notar, por ejemplo, que el comportamiento críptico puede lograrse de maneras que encajan perfectamente aquí. Una es disfrazarse hasta hacerse indistinguible del paisaje inmediato (como hace un camaleón y tantísimas otras especies), pero cuando no se tiene capacidad alguna de disfraz todavía queda la posibilidad de actuar a la inversa, buscar una parte del paisaje que se parezca al individuo y *esconderse* en él (como hacen tantísi-

mas otras especies). El anterior ejemplo de la aleta para nadar de peces, mamíferos y pájaros sirve también como ilustración de la larga carrera de la movilidad.

Es curioso constatar que las funciones que favorecen la independencia de los individuos vivos de la incertidumbre de ciertos entornos pueden llegar a contradecirse entre sí. La inercia por tamaño, la defensa y la movilidad, por ejemplo, llegan con frecuencia a una situación de aparente dilema. Moverse con agilidad en según qué paisajes requiere no ocupar demasiado espacio, así que el crecimiento puede llegar a dificultar la movilidad (como ocurre con la cornamenta de tantos herbívoros). En estos casos, la solución es de compromiso, donde el compromiso es una nueva función de pacto que hace viables otras dos en conflicto. La nueva función que hace que crecer y moverse se reconcilien finalmente puede ser, por ejemplo, el *empaquetamiento*. Y no hay inconveniente en adelantar que la emergencia de una forma viva puede conseguirlo: la espiral.

Independencia nueva

Otra manera no trivial de independizarse cuando la incertidumbre aumenta consiste en renunciar a la propia identidad y seguir vivo con otra (¿más independiente?). Ya hemos comentado que con la selección natural la solución precede al problema, así que, hablando correctamente, digamos que un cambio de identidad, cualquiera que sea la causa, puede ser una solución cuando el capricho de la incertidumbre se presenta.

La reproducción y la asociación son prestigiosos procedimientos para crear identidades nuevas. Cualquier error de replicación es una innovación que se propaga con la reproducción, pero sobre todo con la reproducción sexual, un verdadero generador de variabilidad por combinación de las identidades de individuos diferentes. La nueva identidad puede ser más o menos independiente de la incertidumbre del entorno. Pero está claro que si lo es más, tendrá más cartas para afrontar la nueva compatibilidad con el entorno. El descarte de innovaciones (cambios inviables) aumenta con la incertidumbre reinante. Las que quedan pueden suponer un aumento de la independencia o, de mo-

mento, simplemente «quedarse ahí». Quedarse ahí hasta que la propia selección las elimine o hasta que, en otro estado del entorno, la innovación sí suponga una ventaja en el sentido de una ganancia de independencia. Con el tiempo, las innovaciones seleccionadas se acumulan. Una incertidumbre baja o constante no tiene por qué animar una línea en algún sentido progresiva de innovaciones. Resulta que todos los entornos no tienen la misma incertidumbre. Resulta que la incertidumbre de un entorno no tiene por qué mantenerse constante. La evolución de una forma viva puede ser progresiva o regresiva, pero el progreso de una forma viva no se comprende por su capacidad de adaptación a una clase de entorno, sino por su capacidad de independencia respecto de las variaciones de tal entorno. La llamada presión selectiva no es tanto la competencia ante un reto determinado, sino el aumento de la incertidumbre del entorno. El concepto de progreso es un concepto que a biólogos como Gould les pone los pelos de punta. [30] Si progresar es ganar independencia respecto de la incertidumbre del entorno, entonces... ¡Claro que hay líneas progresivas y líneas regresivas! Cuando la incertidumbre aumenta, la complejidad de los sistemas tiende a aumentar. Es el aspecto vertical de la evolución. Cuando la incertidumbre disminuye, el concepto relevante no es la complejidad sino la diversidad. En esta situación, la competencia se desvía hacia la eficacia (gastar menos, aprovechar más, evitar la competencia). Dentro de una misma especie el simple «ruido» aumenta la variabilidad de los individuos. Se está más cerca de la idea del «todo vale». Hay menos exigencia para admitir una novedad. La incertidumbre del entorno es más inmediata, es la incertidumbre a corto plazo, la de los otros seres vivos que comparten un mismo paisaje. Se promocionan los especialistas y se prodigan los contratos simbióticos. El ecosistema se afina y la diversidad tiende a aumentar. Es el aspecto horizontal de la evolución. Ya podemos dibujar un esbozo de una posible línea progresiva. La emergencia de una línea progresiva no es necesaria ni obligatoria, pero sí razonablemente probable para una sucesión de estados de incertidumbres alternativamente altos y bajos del entorno. Tal evolución del entorno ha sido frecuente en la historia del planeta: momentos de paz local a corto plazo que aumentan la diversidad y picos de catástrofes a largo plazo que aumentan la complejidad. El auténtico progreso es una independencia trabajada a gran escala: los momentos de gran presión

selectiva debidos a una incertidumbre alta se alimentan de la diversidad lograda en momentos de baja incertidumbre. Para que en los momentos críticos haya dónde escoger, debe haber intervalos durante los que se fabrica variedad. Las líneas progresivas emergen de una adecuada oscilación de incertidumbres. Nuestro planeta quizá se caracteriza porque tales oscilaciones son probables. Si el mundo no fuera onduladamente incierto, aún seríamos todos bacterias. A largo plazo, siempre hay crisis importantes provocadas por grandes cambios de la materia inerte, manchas solares, meteoritos, variaciones del campo magnético terrestre, etcétera. A corto plazo es difícil alcanzar largas pausas de buena armonía. En otros entornos, en otros planetas es muy posible, claro, que la vida ni siquiera llegue a emerger o que, si lo hace, no llegue a superar el nivel de microorganismo. En cualquier caso, uno tiene la impresión de que la vida siempre alcanza los niveles más altos que son compatibles con su entorno. La vida aprieta. De algún modo esta intuición está contenida en la definición que hemos propuesto para un individuo vivo.

Gould argumenta en uno de sus libros [30] que el aparente aumento de complejidad de los individuos vivos es una ilusión, que si aumenta es porque no puede disminuir. Lo compara a los bandazos aleatorios de un borracho que camina paralelo a un muro: como no puede atravesar el muro, la tendencia es hacia la calzada. La posición de Gould equivale, creo, a renunciar a comprender. La introducción del concepto de independencia y la consideración del entorno de un ser vivo como parte inseparable de él mismo con la que se intercambia materia, energía e información explican la emergencia de líneas progresivas en la evolución. Justo lo que podemos observar.

Otra manera de crear una nueva identidad es hacerlo a partir de dos viejas identidades. Es cuando dos individuos se asocian para crear uno nuevo. Existen como mínimo dos grandes modos de generar asociaciones viables: entre individuos similares —digamos, en sentido amplio: sociedad— y entre individuos distintos: digamos, en sentido literal: simbiosis. El primer caso abarca desde el concepto de familia hasta el de sociedad propiamente dicha, pasando por el de mero agregado, conjunto gregario o manada. El mecanismo fundamental es la reproducción, sobre todo la reproducción sexual. Se trata de una situación fundamentalísima que explica cómo los individuos escalan los niveles

jerárquicos de la organización de la materia viva. La idea es clara en nuestro contexto:

El individuo sacrifica algo de su identidad individual a cambio de ganar algo de independencia respecto de la incertidumbre de su entorno.

El sentido de la selección natural también adquiere ahora un especial aroma:

El individuo aumenta su dependencia de otros individuos similares y se integra en un conjunto viable si es menos dependiente de la incertidumbre del entorno de lo que lo son los individuos por separado.

Los ejemplos son interminables. Con este esquema conceptual se puede analizar el grado de conveniencia de la mismísima unidad matrimonial. Los contrayentes de un matrimonio aumentan algo su mutua dependencia individual, pero ¿gana la pareja alguna clase de independencia con ello? En principio parece que sí, pueden compartir el alquiler de la vivienda, el transporte en tiempo de ocio, cuidarse el uno al otro (espero sinceramente no levantar dudas en ninguna pareja con este comentario). Un ñu solitario depende más de las inclemencias del entorno que un ñu en manada. Los pingüinos resisten mejor las fluctuaciones de temperatura gregariamente... La identidad de un individuo construido por asociación puede ser tan fuerte que su nueva unidad se hace irreversible. Eso es lo que ocurre con los insectos sociales. La colonia de hormigas es, sin la menor duda, un individuo vivo más independiente de la incertidumbre del entorno (¡y más complejo!) que cualquiera de sus miembros (es más que la mera suma de complejidades). El tema adquiere aquí matices apasionantes. ¿Cómo fue el tránsito hacia los primeros metazoos? Durante miles de millones de años tan sólo hubo bacterias cuya independencia fue transformando el entorno. Ignoramos cómo, pero hace unos cientos de millones de años el método de crear nuevos estados estacionarios por asociación dio sus primeros frutos. Hoy sabemos que, en condiciones desfavorables del entorno, muchas bacterias se agregan estableciendo incluso vínculos mecánicos, lo que confiere al conjunto una textura de fina y consis-

tente película. Reaparece la misma idea: el aumento de la incertidumbre del entorno es la presión que anima la escalada a través de las sucesivas estructuras jerárquicas.

La reproducción sexual es el gran mecanismo para generar nuevas identidades a partir de la unión de antiguas identidades. Con la sexualidad surge de hecho el concepto de muerte necesaria. Dentro del hormiguero la incertidumbre está bien controlada y la reproducción se produce sin problemas. Las obreras mueren, pero se reponen fácilmente con nuevas obreras. La *nurserie* donde crecen los individuos inmaduros (huevos, larvas y pupas) es la sección más protegida de la colonia. Sin embargo, el individuo colonia trasciende al individuo obrera. La colonia vive tanto como la reina. Pero antes de que la reina y la colonia mueran, el propio hormiguero se puede reproducir con la creación de una nueva reina que funde, en otro lugar, de otra incertidumbre, una nueva colonia. En el Museu de la Ciència de Barcelona tenemos una colonia de hormigas cortadoras de hojas tropicales muy activa y saludable. Los visitantes pueden contemplar todas las labores de la colonia, cómo salen al exterior, cortan hojas, vuelven con ellas, cultivan con ellas los hongos con los que se alimentan, o cómo asisten a la reina, cómo limpian y retiran los cuerpos de las hormigas muertas y, sobre todo, cómo se esmeran en garantizar la continuidad de la población. La hormiga, como individuo-organismo, se reproduce a la perfección en la incertidumbre controlada de la cautividad. En cambio, nunca se ha conseguido que se reproduzca un hormiguero en cautividad (es decir, que dé lugar a otro hormiguero lejos de la incertidumbre de su hábitat natural).

Otra manera de crear una nueva identidad por asociación consiste en la integración de dos o más individuos diferentes. Es la *simbiosis*, un hermoso fenómeno que ha dado lugar a elegantes propuestas sobre la evolución de las especies [44]. La idea se lee aquí, en esencia, como en el caso anterior de la asociación:

El resultado de la simbiosis es más independiente respecto de la incertidumbre del entorno que cualquiera de los simbiontes por separado.

Además, la simbiosis no es en general una mera yuxtaposición de identidades diferentes. Entre los elementos que pactan una simbiosis

suele haber una interacción no nula, lo que genera un nuevo individuo cuya independencia es incluso mayor que la de la suma de sus partes. Las ilustraciones aquí también son sencillamente inagotables. Digamos sólo que una célula que come bien y se mueve mal se puede aliar íntimamente con otra que come mal pero que se mueve bien, para inventar una nueva célula mucho más independiente de la incertidumbre del medio que cualquiera de las dos firmantes del pacto. Lynn Margulis ha mostrado la potencia generadora de la simbiosis en microorganismos y nadie duda de que tal cosa se extienda con enorme insistencia a todos los sentidos y niveles de la organización biológica. La presión de la incertidumbre del entorno es el gran estímulo para el establecimiento de pactos simbióticos.

8
La emergencia de las formas en la naturaleza a partir de la ocurrencia de un niño de cinco años

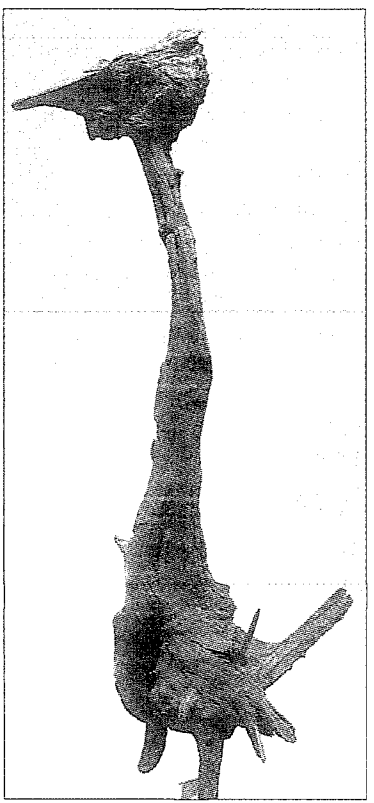


Figura 8.1. Rama con forma de pájaro seleccionada por el niño Jordi Jaqués en Calaceite (Teruel, colección MCFLC, fotografía de Hernán Crespo).

Ya tenemos un esquema conceptual con el que afrontar la comprensión de cualquier objeto real. O de cualquiera de sus propiedades. Por ejemplo: la forma. Comprender la forma de los objetos que nos rodean es una pretensión legítima. Es la hora de explicar una historia.

Yo había leído, como casi todo el mundo, el gran libro de D'Arcy Thomson *Sobre el crecimiento y la forma* [1], varios trabajos del gran Haeckel y, de forma ocasional, a algún otro devoto de la forma en el mundo vivo. Todas aquellas lecturas debieron de instalarse en algún lugar de la memoria y allí es donde despiertan una tarde de verano en Calaceite, un pueblo del bajo Aragón donde veraneo de vez en cuando. Un vecino de unos cinco años de edad, con quien bromeo a menudo, se acerca de una manera poco habitual. Avanza empujado por su madre y parece esconder algo tras de sí. El pequeño sonríe muy tímido, pero la madre le anima:

—Vamos, vamos, dáselo ya, le va a gustar mucho, ya verás...

Miro al niño con cara de pregunta y por fin se decide:

—Toma, para tu museo...

Es una rama de almendro de unos treinta centímetros, una rama con una inconfundible forma de pájaro. No le falta nada, el cuello, la cabeza, el pico, las alas plegadas sobre el cuerpo, las patas... (figura 8.1).

—¡Cielos, Jordi, qué maravilla! —la sonrisa no le cabe en la cara...

Creo que todos interpretan mi alegría como una cortesía para premiar la ilusión de un niño. Pero Jordi y yo sabemos que no es así. ¡Un pedazo del mundo vegetal con la forma casual de un representante del mundo animal! Cinco años después de aquel episodio, el objeto se había convertido en la pieza central de una exposición sobre la forma y en la imagen que la identificaba por toda la ciudad. La exposición, titulada *¡Y después fue la forma...!*, se abrió en el Museu de la Ciència de la Fundació "la Caixa" en Barcelona. Mis paseos por las orillas del río Matarraña adquirieron a partir del regalo de Jordi un nuevo sentido porque me empeñé en buscar cantos rodados ¡intocados! que pudieran servir de letras. La cosecha de una tarde sirvió para escribir la palabra «pato» (figura 8.2). Pero una cosa es encontrar letras y construir una palabra y otra intentar construir una palabra y ponerse a buscar las letras necesarias. La idea era lograr piedras para escribir parte del título de la exposición: «la forma!».

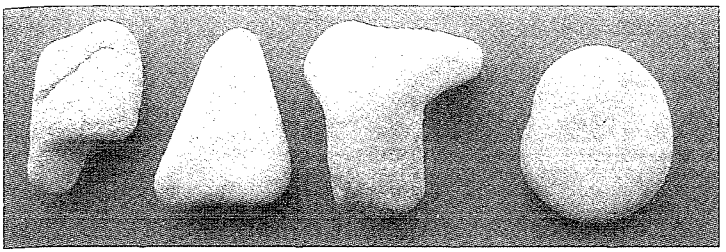


Figura 8.2. «PATO» es el resultado (no buscado) de una mañana de paseo por las orillas del río Matarraña. En una mañana no es difícil componer una palabra (colección MCFLC, fotografía del autor).

Pocas veces he tenido una tarde de paseo fluvial tan entretenida. He aquí lo que ocurrió. A los pocos segundos, quizá menos de veinte, ya había encontrado la o y el punto del signo de exclamación (forma: simetría circular). Reflexión: la simetría circular es altamente probable. Las dos letras a no se hicieron de rogar demasiado. Invertí unos veinte minutos en seleccionar dos buenos triángulos de parecidas características. La letra eme no cuenta en este análisis porque la había recogido algunos años antes, mucho antes de saber que algún día iba a necesitarla, pero si lo hice (recogerla sólo por su rareza) es porque intuía que un día me sería útil. Una letra erre convincente requirió ya tres meses. La efe, ocho meses. Y, cuando ya había perdido toda esperanza de dar con una ele, apareció de repente clavada, gracias justamente a su forma, en la pezuña de una pacífica oveja. No fue fácil convencerla de mis intenciones, y cuando yo me acercaba con sigilo y disimulo, ella arrancaba en el último momento con un trotecillo cada vez más fastidiado e inquieto. Pero no podía rendirme y desaprovechar una ocasión cósmica como aquélla. Tras varios intentos, la letra ele se desprendió de forma espontánea. En total, la gestación de las dos palabras alcanzó los nueve meses (figura 8.3). Hoy el conjunto se exhibe en el Museu de la Ciència de la Fundació "la Caixa" en Barcelona.

La selección, como bien ilustra la rama-pájaro o el litotítulo de la exposición, no inventa ni crea formas sino que, sencillamente, las deja pasar, las filtra, las concentra, distorsiona la probabilidad de su presencia. La selección cambia la frecuencia con la que lo seleccionado apa-

Figura 8.3. «LA FORMA!» es el resultado (buscado) de cuarenta y ocho mañanas de paseo por las playas fluviales del río Llobregat. Decididamente, las formas de los cantos rodados no son equiprobables (colección MCFLC, fotografía del autor).

rece en la realidad. Tal es el salto entre el antes y el después de una intervención de la selección. Cada clase de selección (fundamental, natural y cultural) introduce una clase de función homónima. De ahí surge una primera clasificación y, por lo tanto, también una primera inteligibilidad de las formas en la naturaleza. En efecto, una forma de un objeto real sólo puede corresponder a una de las siguientes clases (o combinación de ellas), de nuevo: formas fundamentales, naturales o culturales.

En particular, las piedras que sirven para escribir «la forma!» son formas espontáneas, o, si se quiere, y por haber superado selecciones de tipo fundamental, formas fundamentales, formas que se explican según las leyes de la físico-química de la abrasión, arrastre y demás avatares menos o más contingentes de su carrera cuesta abajo hacia el mar. Mucho mejor dicho, eran formas fundamentales cuando estaban perdidas entre los demás cantos rodados del río. Sin embargo, ocho meses después, juntas en una vitrina de la exposición, en el orden preciso que las hace legibles, las mismas piedras han superado otra selección, una selección cultural que las convierte en formas de otra clase, las formas culturales. Digamos entonces que las tres grandes clases de formas suponen ya un primer paso para comprender la forma.

Nuestro esquema conceptual sugiere que una buena idea para comprender la forma de un objeto pasa por explorar las funciones (fundamentales, naturales o cultas) que comparte con otros objetos de igual o parecida forma. Esos objetos constituyen una familia cuya población define, justamente, la frecuencia de su presencia en la realidad, una presencia que puede ser el resultado de las selecciones (fundamentales, naturales o culturales) que ha superado para perseverar en la realidad.

Además, todo ser que persevera lo suficiente como para trascender está en ciertas buenas condiciones de seguir perseverando. Perseverar equivale a soportar (resistiendo, modificando o anticipando) la incertidumbre. Por lo tanto, en ausencia de ulterior información, cuanto más se ha perseverado mayor es la probabilidad de seguir perseverando. Esta afirmación no se apoya sólo, directamente, en el patrimonio de funciones acumulado. También se explica, de forma indirecta, a través del llamado *principio de mediocridad universal*. Abrimos ahora un breve paréntesis para comentar este principio, que tanto tiene que ver con una mente que contempla y piensa la emergencia y permanencia de un pedazo de realidad.

El principio de mediocridad

Pensar, lo que se dice pensar, siempre piensa una individualidad. Es la mente, un episodio más de la historia que, en la realidad de este mundo, dura lo que dura: el tiempo que media entre su principio y su final. Desde este minúsculo lapso incrustado en la colosal edad del universo, la mente se interesa por el resto de sucesos de la historia. El presente de la mente clasifica los sucesos en tres clases: los sucesos que han empezado y ya han acabado, los sucesos que ya han empezado pero aún no han acabado y los sucesos que aún no han empezado.

El presente es una fina línea a través de la cual el pasado engulle el futuro. La ciencia predice con éxito razonable la duración de un fenómeno que ya es historia. Con unos pocos restos y unos pocos rastros se hacen maravillas en geología, paleontología, arqueología o investigación policial. Otra cosa son los sucesos que aún no han empezado. ¿Cómo estimar lo que va a durar un suceso si no sabemos bien de qué suceso se trata, ni si va a suceder, ni cuándo? Pero la mente no se desanima. Anticipar el futuro sin datos es quizás el segundo oficio más viejo del mundo. De él viven, unos más deshonestamente que otros, profetas, adivinos, científicos... desde el amanecer mismo de la humanidad. Llegamos así a la familia de sucesos que más nos afectan, nuestros coetáneos, los que ya han empezado pero aún no han terminado. De ellos podemos conocer al menos un dato: el tiempo que llevan rodando

por este mundo. Supongamos que no sabemos nada más. ¿Podemos estimar el tiempo que les queda?

La materia existe desde hace 13.500 millones de años; ¿cuánto le queda? La vida se asoma al planeta hace 3500 millones de años; ¿cuánto le queda? El *Homo sapiens* supera los 200.000 años; ¿cuánto le queda? Cataluña ha cumplido mil años; ¿cuánto le queda? Yo ya he gastado 54 años de mi vida; ¿cuánto me queda? Un partido político gobierna desde hace siete años y ocho meses; ¿cuánto le queda? Un valor en bolsa lleva subiendo seis semanas seguidas; ¿cuánto le queda?

La peor predicción que podemos hacer es un número comprendido entre cero (acaba ahora mismo) e infinito (no acabará nunca). La gran pregunta ahora es: ¿podemos hacer una predicción mejor? Podemos, sí. Basta aplicar el principio de mediocridad. La mente, cualquier mente, tiende a situarse a sí misma en el centro del espacio y del tiempo. El principio de mediocridad nos invita a romper este prejuicio. La hipótesis equivale a reconocer que no existen observadores de privilegio. En consecuencia, y en ausencia de ulterior información, la mente pensante tampoco es el centro de nada. O sea, cuando observamos un suceso coetáneo, nuestra posición no tiene nada de especial dentro del intervalo que media entre su principio y su final. Calculamos.

Para calcular el tiempo (X) que resta, sólo se necesitan dos números: el tiempo transcurrido (P) y la fiabilidad (f) con la que queremos hacer la estimación. De la vida total del suceso ($P + X$) renunciamos a un pequeño tanto por uno (k) de su comienzo y de su final. Con estos mordiscos en los extremos, la probabilidad f de acertar con la predicción queda fijada ($1 - 2k$). Aplicar el principio de mediocridad es asumir que nada tenemos de especial al observar el suceso y, por lo tanto, no nos encontramos ni en el margen del comienzo ni en el margen del final, sino en cualquier instante del segmento restante. Una breve operación (es un sistema de dos simples inecuaciones) permite deducir la elegante fórmula de J. Richard Gott: [45] el tiempo que resta (X) está comprendido entre dos valores: es menor que su pasado (P) multiplicado por un factor que sólo depende de la fiabilidad prefijada (el cociente entre $f + 1$ y $f - 1$) y es mayor que su pasado P dividido por ese mismo factor.

En suma, si queremos una fiabilidad perfecta (no equivocarnos, $f = 1$), la fórmula no arriesga nada y predice un tiempo futuro entre cero e

infinito, o sea, el suceso acabará entre ahora mismo y nunca. Si fijamos un error seguro ($f = 0$), la fórmula arriesga el máximo y predice un futuro nulo, el suceso se acaba con sólo mirarlo. Pero existen infinitas situaciones intermedias. A más riesgo menos fiabilidad. Elijamos una buena fiabilidad, por ejemplo el 0,95 y atendamos al resultado. El principio de mediocridad anuncia que el tiempo futuro será mayor que el tiempo pasado dividido por 39 y menor que el tiempo pasado multiplicado por 39. Si nos conformamos con una predicción de sólo el cincuenta por cierto, entonces el factor multiplicativo es 3. La idea se le ocurrió al astrofísico Richard Gott mientras visitaba el muro de Berlín con su amigo el astrónomo Charles Allen en 1969. El muro se había construido ocho años antes, así que la predicción fue, con 0,5 de fiabilidad, que el muro duraría más de dos años y ocho meses, pero menos de veinticuatro años. Cuando el muro cayó veinte años más tarde, Gott llamó muy excitado a su amigo y decidió escribir un artículo para *Nature*.

Ahora, con un 0,95 de fiabilidad, respondemos a las preguntas anteriores: la materia aún durará más de 346 millones de años, pero menos de medio billón de años. La vida animará el planeta durante 90 millones de años como mínimo, pero no más de 137.000 millones de años. La humanidad resistirá un mínimo de 5100 años, pero se extinguirá antes de 7,8 millones de años (¡lo que ya sucediera, más o menos, con los anteriores homínidos!). Una civilización milenaria tiene asegurado un mínimo de 26 años y un máximo de 39.000. Yo pienso aprovechar el año y cinco meses de vida que me garantiza el principio de mediocridad, celebraré cualquier ulterior propina y me conformo con ese tope máximo de 2106 años. El partido continuará gobernando un mínimo de 72 días, pero no conseguirá superar los tres siglos. Si unas acciones en bolsa llevan subiendo seis semanas, aún se puede aguantar un día más sin vender, pero sería temerario en un 95% esperar después a que sigan subiendo otros 54 años. En cambio, con el 50 por ciento de error, la predicción es más inmediata: las acciones subirán un mínimo de dos semanas más, pero nunca más de dieciocho.

El principio de mediocridad funciona. Gott prefiere llamarlo principio de Copérnico, en honor del científico que rompió con el prejuicio de que la Tierra está en el centro del universo y dio paso con ello a la revolución newtoniana. El principio de mediocridad premia a sus usua-

rios. Aplicarlo no es precisamente un gesto intuitivo, pero quizás se amague detrás de todas las grandes revoluciones. Moisés: todos los hombres son iguales ante Dios (aunque algunos sean los elegidos). Grecia: todos los ciudadanos son iguales ante la ley (aunque no todo humano sea un ciudadano). Las revoluciones americana y francesa: todos los seres humanos son creados iguales y libres (aunque no se lo parezca a los esclavos y a las mujeres). Marx: ningún ser humano es especial respecto de los medios de producción (aunque la ilusión sea tenaz). Darwin: el ser humano no ocupa un lugar central en la evolución de los seres vivos, es sólo una especie más (digan lo que aún dicen nuestras tradiciones). Einstein: una ley de la naturaleza no puede depender de las condiciones particulares del observador... El principio de mediocridad es un principio saludable y agradecido. Sólo hay que acordarse de él y, de un salto, quitarse de en medio. Igual cae un pedazo de nuevo conocimiento.

Cerramos paréntesis. La frecuencia de las formas y las frecuencias de sus funciones nos orientan, con el esquema conceptual en mente, para diseñar la exposición. He aquí una muestra de la manera de proceder, de cómo se hilvanan objetos e ideas. Es una primicia del talante de la segunda parte.

Ideas de una exposición para una teoría

La exposición del museo recibe al visitante con tres esferas de piedra del mismo tamaño, primorosamente iluminadas, mitad bajo la luz, mitad a la sombra, para revelar su textura en torno a su línea de crepúsculo. Las tres giran lentamente en torno a sí mismas. Sobre la primera aparece escrita esta pregunta: ¿UNA ESFERA CONCEBIDA POR UNA MENTE PERFECCIONISTA? Y la esfera es, en efecto, tan perfectísima que el visitante suele precipitarse a asentir, pero, ante su sorpresa, esta esfera corresponde a un huevo de dinosaurio, el de un enorme *Saltosaurus* encontrado en la pampa argentina (figura 8.4a); no es, por lo tanto, un objeto con una forma artificial. Se trata de una forma viva. En la segunda esfera de piedra, menos perfecta que la anterior, la pregunta es: ¡QUÉ!, ¿OTRO HUEVO DE DINOSAURIO? El visitante, intrigado pero levemente mosqueado, duda. Tiene razón en hacerlo, porque la pieza corresponde

a un precioso canto rodado del Llobregat cedido gentilmente por el restaurante Can Garretà de Graugés (Berga) (figura 8.4b). Un cliente observador y de gran sentido estético lo dejó allí un día para deleite del resto de la clientela. No es, pues, un objeto con forma viva. Se trata de una forma espontánea. La pregunta de la tercera esfera de piedra, una esfera de nuevo perfecta y con cierta textura rítmica, no sorprende al visitante: ¡QUÉ!, ¿OTRO CANTO RODADO? Algunos adivinan. Se trata de una esfera concebida por la mente humana y, aunque a muchos les suene a sarcasmo, la forma cultural corresponde a una bala de catapulta del siglo XV cedida por el Museo Militar de Montjuïc en Barcelona (figura 8.4c).

Reflexionemos un poco sobre estos tres objetos esféricos. La simetría esférica es la propiedad común a pesar de tratarse de tres objetos poco sospechosos de estar emparentados entre sí. Una esfera es espontánea, la otra, viva y la tercera, culta. Las tres esferas de piedra son una buena ilustración de esta primera manera de comprender. Son, digamos, formas puras respecto de lo espontáneo, lo vivo y lo culto, en el sentido de que cada una de ellas tiene poco o nada de las otras dos. La clasificación es útil para empezar a comprender la forma de un objeto. Ésta puede ser, en efecto, una buena primera pregunta: ¿es la forma fundamental, natural o cultural? Es una pregunta con respuesta asegurada porque cualquier forma es espontánea, viva o inteligente, o tiene algo de dos de ellas o tiene algo de las tres. Es una clasificación relacionada con la historia del objeto, como lo es la taxonomía de la clasificación en biología respecto del cladismo.

Las letras de piedra encontradas en el río tienen mucho de forma espontánea, nada de forma viva y mucho de forma cultural. La rama-pájaro-regalo de mi joven amigo es un caso de un mucho de forma viva con un mucho de forma cultural. La forma-pájaro acaso precediera con mucho al objeto-pájaro. Una coliflor, otro ejemplo, tiene algo de forma fundamental, mucho de forma viva y bastante de forma cultural. Pensar en la particular dosis de fundamental, natural y artificial que se integra en una forma particular de un objeto particular es una primera parte de un primer plan para comprender la forma. Cuando se clasifica es que ya se tiene una teoría. No es mucho para acabar, pero no está mal para empezar. ¿Cómo continuar? Ya hemos insinuado cómo.

El niño que interrumpe un paseo delante de una rama con forma de pájaro tiene la clave. Su gesto está cargado de sentido, de sentido

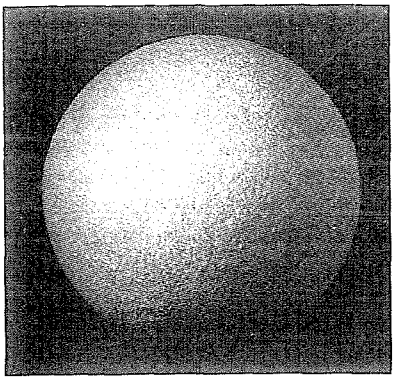


Figura 8.4a. Esfera de piedra emergente por selección natural: un huevo de dinosaurio (*Saltosaurus*, Cretácico Superior, 70 millones de años, Argentina, colección MCFLC, fotografía del autor).

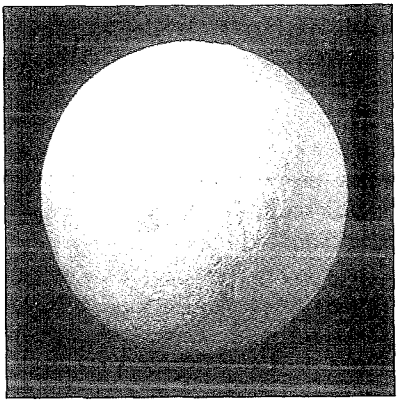


Figura 8.4b. Esfera de piedra emergente por selección fundamental: un canto rodado del Llobregat (Can Garretà, Graugés, Berga, colección MCFLC, fotografía del autor).

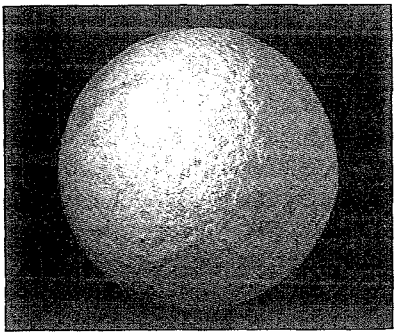
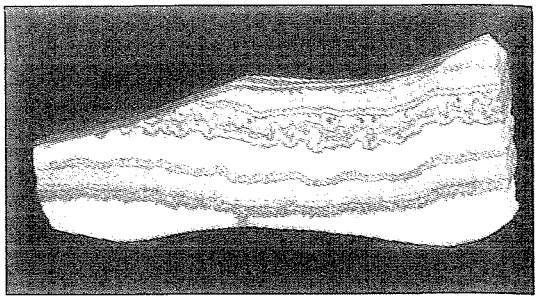


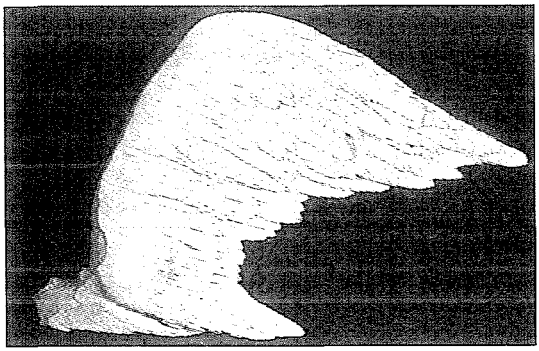
Figura 8.4c. Esfera de piedra emergente por selección cultural: un bolaño (bala de artillería o catapulta) del siglo XV (colección MCFLC, fotografía del autor).

museográfico y de sentido científico. Jordi se detuvo porque la forma del objeto no se correspondía con el resto de las propiedades del objeto, sobre todo con su inteligibilidad y su función. «No corresponder» significa aquí que, dada la experiencia del observador de la naturaleza (en este caso la de un niño de cinco años), el binomio de una particular forma con una particular función es de baja probabilidad. La pieza es rara, singular. Por eso vale la pena seleccionarla y meditar sobre ella, coleccionarla. El pájaro de Jordi nos inspiró para llenar una vitrina con objetos seleccionados según este mismo criterio: una calcita laminada indistinguible de una loncha de tocino (figura 8.5a), una escoria de fundición sorprendentemente parecida al ala de un ave (figura 8.5b), unas concreciones de pirita sorprendentemente parecidas a penes humanos (figura 8.5c), un nudo de un tronco de árbol muy similar a un cerebro... De hecho, existen muchos ciudadanos que coleccionan objetos que parecen lo que no son. Cuando se abrió la exposición en el museo invitamos a los visitantes a que aportaran objetos de esta clase y llenamos una gran vitrina con ellos. Nos sorprendió averiguar hasta qué punto los visitantes del museo estaban preparados de antemano para responder a este reto. La singularidad nos divierte. Tropezar y dar de bruces con el suelo es un viejo gag de los payasos y del cine mudo. El recurso tiene una comicidad infalible porque lo normal es no caerse. Si luego se levanta y echa a volar, entonces nos reímos porque el fenómeno equivale a una burla de las leyes de la gravitación. Es la regla básica de la teoría matemática de la información. Nos sentimos informados cuando contemplamos un suceso improbable. Sin embargo, la comprensión necesita algo más que simple información. Comprender tiene que ver con lo que se comparte, con lo frecuente... Pocas ramas comparten una forma de pájaro. Muchos pájaros comparten una misma forma de pájaro. No hay función que asociar a la forma de un pájaro de una rama. Pero quizás haya una función que asociar a una forma de pájaro que comparten ciertos tipos de pájaro.

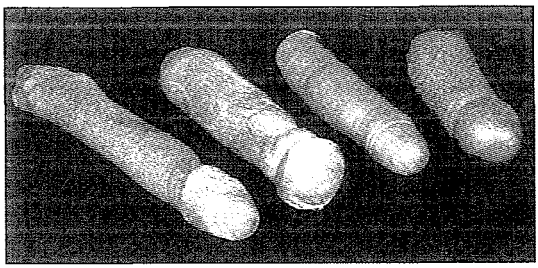
La frecuencia con la que se presenta una forma en la naturaleza se comprende con el tipo de selecciones que han tenido a bien favorecer la forma en cuestión y con la insistencia con la que intervienen las distintas selecciones. La función es el concepto que da justa cuenta de todo ello. Un plan de investigación podría consistir, así pues, en observar no sólo la frecuencia de las formas en la naturaleza sino las funcio-



8.5a



8.5b



8.5c

Figura 8.5a. Objetos que no son lo que parecen. No es tocino, sino una calcita laminada. *Figura 8.5b.* No es un ala de ave sino una escoria de fundición. *Figura 8.5c.* No son penes sino concreciones de pirita (colección MCFLC, fotografías de Sergio Parra).

nes que cumplen. ¡Y comparten! Si comprender tiene que ver con lo común entre lo diverso, entonces comprender la forma tiene que ver por lo menos con dos cosas: los objetos que comparten forma y las formas que comparten función. Es toda una propuesta para construir una teoría general de la forma.

La inteligibilidad de una propiedad inerte, natural o artificial de un objeto tiene que ver con la frecuencia con la que tal propiedad se observa en el respectivo mundo inerte, vivo o inteligente. Cuantos más objetos no sospechosos de estar relacionados entre sí exhiban una esencia común, mayor es la probabilidad de comprender esa esencia común. Dicho de otro modo, esa esencia común es, justamente, su inteligibilidad, la función, la reliquia que la estabilidad o la pervivencia del objeto deja en el propio objeto que hay que comprender.

En un principio hablábamos de ciertas propiedades de un objeto (su composición y estructura (interior), su forma y tamaño (frontera), su frecuencia, diversidad y función (exterior)). La inteligibilidad de un objeto depende de la inteligibilidad de sus propiedades. Pero la inteligibilidad de un objeto se puede considerar, a su vez, como una propiedad más del mismo, sólo que con respecto a un habitante muy peculiar de su exterior: la mente que pretende comprenderlo. Y, para ello, la buena idea consiste en enfrentar la propiedad que pretendemos comprender (por ejemplo: la forma) con una propiedad que podemos explorar y que tiene que ver con la perseverancia en la realidad (es más que un ejemplo: la función favorecida por alguna clase de selección). Lo mismo vale, claro, por extensión, para un objeto que sea, a su vez, parte de otro objeto o para un objeto que resulta ser, a su vez, una población de objetos. Cuanto más *individuo* sea el ente en cuestión (más alto sea su grado de individualidad), más sentido tendrá el intento de comprender. Cualquiera de los siguientes binomios suena prometedor: estructura-función, composición-función, tamaño-función, frecuencia-función, diversidad-función...

9
Nueve respuestas (o más) para un par (o menos) de preguntas
una intuición a favor de una teoría general de la forma

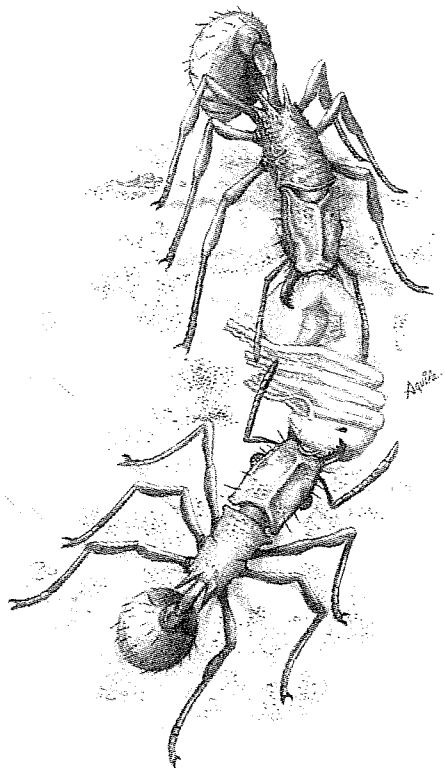


Figura 9.1. Dos obreras de la hormiga *Blepharidatta conops* se disputan (¿) un inmaduro. (Dibujo de Aquila Silva.)

Los objetos tienen forma. Algunos objetos, muy diferentes en muchos aspectos, tienen la misma o parecida forma. Sólo por eso, ya vale la pena embarcarse en la búsqueda de una teoría de la forma. Nada más sensato que acordar cómo nombrar una forma sin aludir al objeto concreto que la exhibe. El lenguaje común ya se ocupa de ello. Usamos la palabra esfera en lugar de decir «forma de planeta», «forma de naranja» o «forma de burbuja». El lenguaje es una construcción mental que sirve para abstraer un concepto asociado a un objeto particular de la realidad. En un idioma moderno hay unas 85.000 palabras, un número mucho menor que el de objetos existentes en la historia de la materia y que el de la inmensidad de propiedades y matices que éstos puedan presentar. El diccionario no está mal para empezar. Sin embargo, y como ocurre siempre en ciencia, el lenguaje de la vida diaria se queda corto. Cualquier teoría necesita construir su propio lenguaje, más manejable, más completo, más abstracto, más flexible, más preciso, más en armonía con el esquema conceptual elegido. Para esto está, por ejemplo, la matemática.

Las tres clases de selección (fundamental, natural y cultural) son los pilares de nuestro esquema conceptual para comprender la forma. Bien, pues la forma matemática también tiene su definición, basada asimismo, curiosamente, en cierta clase de selección. Se trata, podemos llamarla así, de la *selección matemática*, una cuarta clase de selección: de todos los puntos del espacio, pertenecen a la forma en cuestión todos aquellos puntos, y sólo aquellos, que cumplen cierto pliego de condiciones. Este pliego de condiciones se llama, también curiosamente, función matemática y se expresa como un conjunto de relaciones numéricas entre las coordenadas que identifican los puntos del espacio. La función que define un lugar geométrico se puede considerar también una restricción. No hay dos objetos reales idénticos. Sin embargo, todas las esferas de un metro de radio son idénticas. La función matemática supone, pues, una primera forma de compresión, de reducción y, por lo tanto, también de comprensión. La matemática, como toda abstracción, fabrica inteligibilidad.

Muchos investigadores de la forma se contentan con ello: se comprende una forma cuando se consigue una descripción matemática razonable. La idea no es mala para empezar. Sólo hay que procurar no traspasar cierto límite. Es un límite bien reconocible. Es el límite del

absurdo, cuando resulta que es mucho más simple y compacta la propia forma del objeto real (que se pretende describir) que su inteligibilidad matemática (la que se propone para describirla). La comprensión no puede pesar más que lo comprendido.

La matemática puede proporcionar incluso modelos que describen mecanismos generadores de forma. También interesa. Sin embargo, todo lo dicho hasta ahora es para convencer de que la comprensión de la forma necesita de algo más, algo relacionado con la observación de las formas reales, con la frecuencia de su presencia y con los tipos de selección que dan sentido a la forma en el contexto general de la evolución. En muchos casos la forma matemática de los datos que proceden de observar un pedazo de realidad puede desvelar el secreto de la comprensión profunda de un fenómeno. No resisto la tentación de contar aquí un caso especialmente querido para mí.

Tuya-mía, el misterioso rito de unas hormigas cautivas

Todo empezó con una visita a mi buen amigo Beto Brandao, entomólogo del Museo de Zoología de São Paulo (Brasil) y, sin duda, uno de los especialistas en hormigas más conocidos del mundo. En Brasil aún se puede entrar en una selva tropical, recoger el primer insecto que salga al paso y dar así con una especie nunca antes descrita. Y si permitimos que el animal siga su camino treinta segundos más, igual observamos un raro comportamiento jamás descifrado hasta entonces. Es el caso de la hormiga *Blepharidatta conops*. Patricia Romano da Silva, una joven doctorando orientada por Brandao, trabaja con varias colonias vivas de esta especie. Una tarde, en su laboratorio, Patricia me muestra el prodigio.

Inmediatamente después de que una obrera decide transportar un inmaduro (huevo, larva o pupa), otra obrera se le echa encima para disputarle el privilegio de tan alta responsabilidad. Se inicia así un rito que dura varios segundos, un sereno y tenso «tuya-mía», un duelo que define una vencedora (véase la figura 9.1). El premio es la responsabilidad de transportar el inmaduro. De vez en cuando, y sin motivo aparente, toda la colonia se dedica a practicar el «tuya-mía» con la inocente población inmadura.

—¿Para qué hacen eso?

—¡No sé!

—Alguna razón habrá, ¿no?

—¡No sé!

—¿Imposible saberlo?

—¡No sé!

Al día siguiente, en una reunión insólita (como mínimo poco frecuente), un físico y dos entomólogos fantasean para diseñar un plan que desentrañe el misterio. ¿Cuál?

—Si pudiéramos marcar individualmente las hormigas...

—Podemos hacerlo...

—Quiero decir como si fueran atletas en unos juegos, que podamos reconocer a cada una de las hormigas, que podamos decir: ¡mira, acaba de pasar la hormiga uno, cero, dos, seis...!

—Podemos hacerlo...

—Si además pudiéramos hacer un seguimiento de todas las disputas que ocurran en la realidad y tomar nota de todos los resultados...

—Podemos hacerlo...

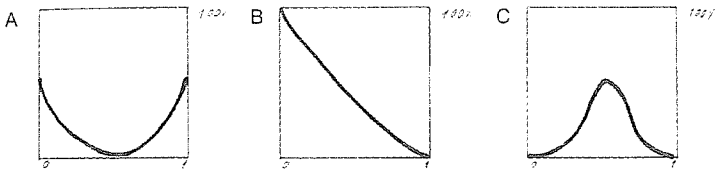
—Pues en ese caso podríamos conseguir unas curvas muy reveladoras: el tanto por ciento del total de hormigas para cada particular tanto por ciento de victorias observadas. Es cuestión de tener un poco de paciencia...

—Podemos tenerla... pero ¿qué nos dirían esas curvas?

—Digamos que sólo podemos encontrarnos con cuatro casos diferentes. Primera posibilidad: las que pierden siempre pierden y las que ganan siempre ganan. La forma de la curva sería inconfundible (figura 9.2a). ¿Sería eso importante para vosotros?

—Lo sería. Y mucho. Equivale a una cierta subdivisión del trabajo. Significaría que existen obreras *sparring* y obreras «transportadoras». En este caso, el ritual del «tuya-mía» tendría una explicación: la fiabilidad del agarre de las mandíbulas, no fuera a ser que éstas cediesen al primer tropiezo o al primer tirón de un ladrón hambriento. Es como el escudero que comprueba el estado de las trinchas de la montura antes de que el caballero arranque a galopar. Sería un importante descubrimiento...

—Segunda posibilidad: las obreras a veces ganan y a veces pierden, de modo que el resultado final determina un *ranking* que permite



Figuras 9.2a, 9.2b y 9.2c. Tanto por ciento de hormigas con probabilidad p de vencer en la disputa (ordenadas) frente a la probabilidad p de vencer (abscisas). Se prevén cuatro casos posibles. *Figura 9.2a.* «Caballeros y escuderos»: las que ganan siempre ganan, las que pierden siempre pierden. *Figura 9.2b.* «Selección preolímpica»: la hormiga número 1 gana a todas, la hormiga número 2 gana a todas menos a una... la hormiga enésima pierde contra todas. *Figura 9.2c.* No hay selección de hormigas: distribución gaussiana, un promedio de la mitad de las hormigas gana un promedio de la mitad de las disputas. D: *Ninguno de los tres anteriores.*

ordenar a las hormigas según sus prestaciones en este tipo de torneos. Algo parecido ocurre con la lista de los tenistas profesionales. Existe la obrera número uno, la número dos, etcétera. La forma de la curva en este caso también sería muy característica (figura 9.2b). ¿Y ahora? ¿Sería un caso de interés?

—Lo sería. Y mucho. Equivale también a una selección de hormigas. En este caso incluso podríamos hablar de una especie de «selección preolímpica» destinada a actualizar continuamente la lista de las mandíbulas más seguras para el transporte de inmaduros. También sería un descubrimiento importante.

—Tercera posibilidad: las obreras ganan o pierden de manera aleatoria. La forma de la curva, curiosamente, no es una cualquiera, sino una forma muy conocida por los físicos. Es la llamada distribución normal o gaussiana (la mitad de las hormigas tiene un cincuenta por ciento de éxito en las disputas) (figura 9.2c). En este caso, el «tuyamía» o bien es para detectar inmaduros accidentalmente mal agarrados, o bien no se refiere en absoluto a las obreras, sino al propio inmaduro, quizá se trate de un tipo de «agítese antes de usar».

—Cuarta posibilidad: ninguna de las anteriores. La investigación sigue próxima al comienzo, la investigación continúa...

Este plan encaja bien con la metáfora de Feynman: el científico descubre las leyes de la naturaleza como el novato que deduce las re-

glas de juego del ajedrez tras largas horas de mirón en partidas de café. La inteligibilidad que buscamos en el caso del extraño comportamiento de las hormigas, lo que todas las disputas tienen en común, se compacta, se resume, se reduce, se comprende en la forma de una curva matemática que compacta bien una larga serie de datos sobre la realidad. La forma matemática, tal como ha sido concebida, destaca la esencia mientras amortigua los matices de un fenómeno real.

El resto de la historia se aparta ligeramente de nuestra reflexión sobre la forma matemática, pero no voy a dejar al lector sin saber cómo acabó la investigación [24]. Así que abro un breve paréntesis. La agrupación de todos los resultados de todas las disputas no fue el que más deseábamos, aunque sí debió de ser el que más debíamos de esperar, el más decepcionante de entrada, la alternativa tres. O sea, nada. O, mejor dicho, algo sí: una gaussiana es la forma que indica que el comportamiento no implica ninguna clase de selección de hormigas. Eso es algo. Pronto llegaron los datos que faltaban. Dos datos en especial permiten esbozar una explicación. Primero: el «tuya-mía» se desencadena en toda la colonia simultáneamente, cada vez que el ambiente transmite una vibración. El termostato que daba la señal de arranque al aire acondicionado del laboratorio también daba la señal para una sesión de «tuya-mía». En cambio, en la mesa supermasiva (antivibraciones) del microscopio electrónico del sótano del museo nunca se daba el fenómeno. Es fácil, por otro lado, provocar el fenómeno a voluntad con cualquier vibración artificial. Segundo dato: estas hormigas tienen un enemigo ladrón de inmaduros muy especializado. Se trata de un escarabajo semiesférico que penetra dentro del nido y trata de sorprender a la colonia robando algún tierno inmaduro para comer. Una vez que el escarabajo ha dado el «tirón», ya no hay manera de recuperar la pieza, ya que el depredador la esconde debajo de sí mientras la devora y ofrece una media esfera resbaladiza a las desesperadas hormigas (como veremos más adelante: la esfera protege). He aquí una posible explicación del «tuya-mía».

Por selección natural, el «tuya-mía» favorece que el escarabajo robe lo mínimo. En efecto, el «tuya mía» fija una dirección de entre infinitas posibles. Con esto desaparece el factor sorpresa sobre la dirección que elegirá el coleóptero para dar el tirón. Un inmaduro fuertemente asido por dos obreras tiene menos grados de libertad. Pero aún sería posible sorprender a las obreras si éstas no están del todo por la

labor. ¿Cómo mantener su concentración para asir el inmaduro? El «tuya-mía» equivale a una señal mutua para inquirirse mutuamente por la concentración que requiere el caso:

—¿Estás atenta?
—¡Lo estoy! ¿Y tú? ¿Lo estás también?
—¡Claro! ¿Y tú?
—¡Sí! ¿Y tú?
—¡Sí! ¿Y tú?
—Tuya...
—Mía...
—Tuya...
—Mía...
—Tuya...
—Mía...

Comprender la comprensión

Con la forma matemática, el esquema conceptual gana un grado. A la selección fundamental (que regula la emergencia de las formas en la realidad inerte), la selección natural (que las consagra y concentra en la realidad viva) y la selección cultural (que las inventa en la realidad inteligente), se añade ahora una cuarta selección matemática (que las define y las nombra como entidades comunes a una diversidad de objetos). La selección fundamental proporciona mecanismos que generan, con el permiso y la contribución de la incertidumbre reinante del momento y el lugar, cierta variedad de innovaciones (formas, por ejemplo), tanto si después se consagran o no en favor de algún individuo vivo. Tal cosa ocurrirá quizá si la innovación en cuestión ayuda a un individuo a mantener su identidad independiente de la incertidumbre de su entorno. En el lenguaje metafórico de Richard Dawkins [25], los resultados de la selección fundamental equivalen a las montañas, que ahí están para ser escaladas, haya o no alguien dispuesto a escalarlas finalmente. Ciertos pensadores de la biología moderna cargan sobre esta idea casi todo el peso de la inteligibilidad de la evolución biológica. Muchas formas, como se esfuerza en demostrar por ejemplo Brian Goodwin [23], emergen como consecuencia directa de la no li-

nealidad de ciertas dinámicas. Es verdad. Emergen por ésta y otras mil razones físico-químicas del medio, algunas más sencillas y otras más complejas. De acuerdo, pero ¿cómo se consolidan en la realidad viva?, ¿cómo aumenta su frecuencia hasta llegar a merecer una palabra del lenguaje común? ¡Su probabilidad de emergencia en la realidad inerte está muy lejos de coincidir con su probabilidad de presencia en la naturaleza viva! Falta, por lo menos, la otra mitad de la inteligibilidad. Tras la función fundamental emerge la función natural.

Si el darwinismo tiene algún flanco débil, dudo de que esté del lado de la selección natural. Esta polémica, y creo que muchas otras no menos interesantes, se ilumina con sólo volver al objetivo último de toda actividad científica: comprender. Conviene hacer aquí una última parada. ¿Cuál es el grado de comprensión que proporcionan los modelos matemáticos que tanto apasionan a científicos como Goodwin y, en general, a tantos otros estudiosos de la complejidad? La clave, una vez más, está en la compre*n*sión como capacidad de compresión. Cuantos más sucesos o fenómenos de la realidad queden comprehendidos por un modelo, más alto será su grado de comprensión. Si son más bien pocos, el modelo será una ley más bien local; si son muchos, el modelo será una ley más bien universal. Si nos impresionan las leyes de la mecánica de Newton es porque comprenden tanto el vuelo de una mosca como el de una galaxia en su cúmulo. Sin embargo, y como le gustaba decir a mi admirado Ramón Margalef, en biología hay que sospechar de cualquier fórmula matemática de más de diez centímetros. La complejidad matemática de una descripción no puede superar la complejidad de la realidad misma. En ese caso, la mejor comprensión de un fenómeno es el fenómeno mismo, tal cual. El siguiente ejemplo es una metáfora que quizá nos ayude a recordar este matiz esencial de la voluntad de comprender. Se refiere a una complejidad muy útil que todos hemos inventado, muy personalmente, y que, unos más que otros, usamos casi a diario: la firma manuscrita.

La firma, de eso se trata, es una complejidad del mundo real, en particular de su región inteligente. Pero ¿qué significa comprender una complejidad así? ¿Qué significa comprender una firma? Consideremos por ejemplo mi firma (figura 9.3a). Supóngase que buscamos la forma matemática que más se ajusta a este objeto real. La encontraremos con la precisión que deseemos. La matemática tiene varios métodos para

conseguirlo, garantizados además por prestigiosos teoremas (polinomios, suma de exponenciales, etcétera). En el límite, podemos tomar una firma particular, acordar el número de puntos que queremos registrar y, sin más, registrarlos. Aun sin llegar al absurdo de dar cuenta con tantos puntos matemáticos como puntos pueden registrarse en la realidad (para ello, para la compresión cero, la propia firma ya se representa bien a sí misma), supongamos que conseguimos un buen ajuste, un modelo con una compresión razonable (figura 9.3m). Nuestra satisfacción se confirma al superponer la complejidad real y su pariente matemática más cercana (figura 9.3am). Pero atención, ¿comprendemos con ello mi firma? Está claro que lo que comprendemos es, como máximo, la particular firma que me ha salido en esta ocasión, ¡pero estamos lejos, muy lejos, de comprender lo que es relevante respecto del concepto «firma»! En efecto, si hago una segunda firma (figura 9.3b) e intento superponerla a la comprensión matemática conseguida antes, el resultado será muy decepcionante, y ello a pesar de que también he sido yo el autor de la segunda firma (figura 9.3bm). Para comprender mi firma, mejor sería fijarse en por lo menos dos de mis firmas y preguntarse qué es lo que estas dos complejidades del mundo tienen en común. Lo que comparten es justamente la inteligibilidad de mi firma. En otras palabras, lo que ambas tienen en común es, ni más ni menos, que... ¡yo mismo! Comprender mi firma lo conseguirá un algoritmo capaz de reconocer mi firma en cualquier garabato. A ello aspira el director del banco donde tengo la cuenta corriente, por ejemplo. En el límite, la mejor compresión y comprensión de mi firma tienen que ver con la intersección de todas las firmas que yo pueda llegar a hacer. ¿Cómo conseguir un algoritmo basado en esta otra idea?

En general, la autentificación de una firma se confía a un experto grafólogo (o a un grafólogo forzosamente improvisado, como ocurre con los dependientes de los comercios que acceden a cobrar con cheques o tarjetas de crédito). ¿En qué principios se basa una tarea de tanta responsabilidad? Básicamente se trata de prescindir de los matices, que varían de una firma a otra, y centrar la atención en la esencia común. Para ello hay que cotejar como mínimo dos firmas, la presunta con la de referencia. Pero mejor si cotejamos con otras dos, y mejor aún con otras tres... En algún número de firmas de referencia se estabilizará sin duda la idoneidad del trabajo, es decir, la fiabilidad del juicio

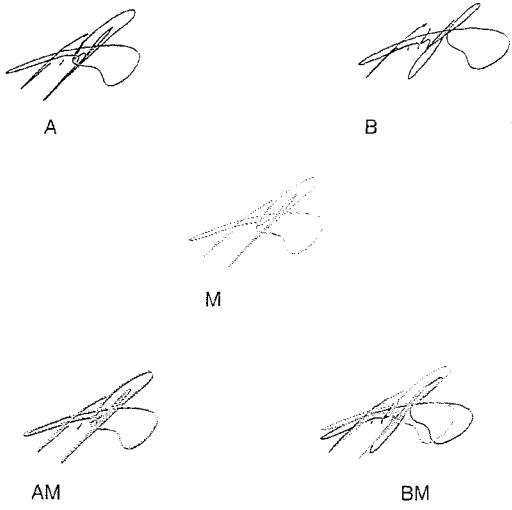


Figura 9.3. Comprender una firma (A) no consiste en obtener la representación (M) que más se ajuste (AM) a tal particular firma, porque el ajuste (BM) con cualquier otra firma (B) del mismo firmante está condenado al fracaso. Comprender la firma de un firmante es conocer lo que hay de común entre todas las firmas que pueda llegar a hacer ese mismo firmante.

del experto alcanzará un límite difícilmente mejorable. Es toda la compresión-comprensión alcanzable de una forma artesanal. Sin embargo, hoy en día proliferan cada vez más las transacciones bancarias y los pagos electrónicos a través de la red en el ciberespacio. Dar con un algoritmo fiable y seguro capaz de garantizar la autenticidad de una firma fresca recibida en un punto de la red que acaba de ser ejecutada en otro punto de la red, debe ser ya un asunto urgente.

Tal como van las cosas, es muy probable que la cuestión ya esté más que resuelta en el momento de escribir estas líneas. En una reciente visita a la Universidad de Campinas (estado de São Paulo, Brasil), me entero, en una charla de café, de la idea de un físico de esta ciudad. Se trata de firmar sobre una plaquita conectada al ordenador sensible a las variaciones de presión que la mano hace en diferentes puntos del espacio durante el proceso mismo de firmar. Firmando va-

rias veces se podría elaborar un mapa en el espacio y en el tiempo de un buen número de presiones. De ese mapa se extrae una información digitalizada que luego se puede analizar por refinados sistemas matemáticos (por transformadas de Fourier, por ejemplo) de modo que una firma, más aún, no sólo el resultado final, sino todo el proceso mismo de firmar, quedaría caracterizado quizá por unas frecuencias y unas amplitudes que harían al autor de la firma insustituible por un posible falsificador. El resto es fácil. Cualquier usuario, comerciante, juez, contratante o contratado, ciudadano en general, podría enviar a una oficina depositaria del algoritmo una presunta firma fresca para solicitar su validación. La seguridad y la fiabilidad aumenta, claro, si en lugar de exigir una firma para rubricar un documento electrónico se exigen dos... El ajuste por polinomios pretende describir la firma sin comprenderla. El algoritmo del físico brasileño no se basa en un análisis visual de la forma de la firma sino en el automatismo que culmina en una cualquiera de las firmas posibles. Es un algoritmo basado en la inteligibilidad del concepto firma: la mínima expresión de lo máximo que todas las posibles firmas tienen en común.

Veamos otro caso bien complejo: el fenómeno religioso. ¿Cómo comprender la religión? ¿Por dónde empezamos? Intentar comprender la religión, como fenómeno, desde el interior de una de ellas es empezar mal. Se estima que desde el amanecer del hombre moderno han existido unas cien mil religiones. La religiosidad, la unión individual y colectiva de los humanos con la divinidad, parece un fenómeno universal ligado a la condición humana. No hay cultura humana sin religión. La clase de inteligibilidad que se gasta en ciencia recomienda abordar la cuestión de otro modo. Mejor centrar nuestro interés en aquello que comparten el máximo número de formas religiosas posibles. Así nos tropezaremos, quizá, con los conceptos clave para comprender el fenómeno (en nuestro sentido de comprensión): la experiencia mística, el éxtasis, las diferentes técnicas para conseguirlo (oración a base de repetir frases, música o bailes que se aceleran lenta y progresivamente, tóxicos, soledad, ayuno...), la omnipresente relación entre la vertiente mística y la vertiente simbólica, la ascética y la jerárquica, la relación de las culturas arcaicas o ágrafas con culturas modernas, las zonas del cerebro donde se mezclan diferentes realidades sin sufrir la menor incomodidad por la emergencia de contradicciones (el sueño y la vida

cotidiana, el arriba y el abajo, seres en los que funden animales de diferentes especies...), elementos del cerebro donde se establece la conexión divina (o infernal), visiones o aprehensiones de distintas clases de infinitudes, como la eternidad... Son los conceptos que se van descolgando en el libro de Francisco J. Rubia titulado *La conexión divina*, un ensayo bien enfocado, creo, desde el punto de vista de la inteligibilidad científica [46]. En el epílogo de la segunda parte aludo a otra buena metáfora de la inteligibilidad científica, una potente intuición de Pablo Picasso.

En el diario *El País* del 1 de abril de 2004, se publicó esta noticia:

TRES DETENIDOS POR COPIAR LA TARJETA DE CRÉDITO DE LA CONSEJERA DE INTERIOR Y GASTAR 2.874 EUROS.

«...Todo empezó cuando la consejera de Interior se dio cuenta de que su tarjeta de crédito oficial había sido usada en Alicante. ¿Cómo era posible que le cargaran diversas compras hechas en esta ciudad por los citados 2874 euros, si ella no había estado allí?... La policía de la Generalitat ha podido localizar a los autores del presunto delito porque se da la circunstancia de que una cliente de Terrassa (...) también había recibido cargos por compras que tampoco había realizado... Al comparar los cargos bancarios, los investigadores se dieron cuenta de que las dos clientas habían acudido al mismo restaurante. Las investigaciones se centraron entonces en el establecimiento de la calle Ferran, donde fueron detenidos los camareros citados y posteriormente su socio».

La policía resolvió el caso después de comprender, en cuanto detectó lo común entre lo diverso.

Cualquiera de estas metáforas ilustra bien el segundo principio del método científico, el que bien podríamos llamar principio de inteligibilidad. Su enunciado suena más o menos así: de todas las maneras de representar con igual mérito la realidad, la ciencia elige la más breve, la que pesa menos, la más compacta. Está en la esencia misma de lo que significa la abstracción. Para que un conocimiento merezca ser calificado de científico, el principio de inteligibilidad es un requisito irrenunciable. No hay excusa posible. No vale, por ejemplo, elegir una representación menos compacta y menos sintética sólo porque es más

intuitiva. Ésa es la grandeza de la ciencia, que puede comprender sin necesidad de intuir. En síntesis:

La mejor comprensión de un pedazo de realidad es la mínima expresión del máximo común denominador de todas sus manifestaciones.

Apliquemos esta idea a la comprensión de un objeto.

Funciones de funciones

El objeto está ahí y lo que deseamos es comprender su existencia. Buscamos una teoría para comprender lo que existe. Y la tendencia a perseverar es, justamente, lo que comparten todos los entes dotados de la propiedad de existir, o de haber existido hasta el punto de merecer trascender (dejar un descendiente, un fósil, un rastro...). Tal es la esencia común compartida. Es el tipo de comprensión que buscamos. En la materia inerte, perseverar significa seguir estable. En la materia viva significa seguir vivo. Y en la materia culta significa seguir inventando. ¿Qué es lo que persevera? Es la identidad de una individualidad. La capacidad para perseverar de una individualidad inerte es la estabilidad, la de una individualidad viva es la adaptabilidad y la de una individualidad culta es la creatividad. En cualquiera de los tres casos existe, como penúltima oportunidad, la de cambiar de identidad (por cierto: si no fuera por ello, hoy aún seríamos todos bacterias procariotas).

Supera la selección fundamental lo que es suficientemente estable, por lo que la estabilidad es la gran función de la materia inerte. Supera la selección natural lo que está suficientemente adaptado, por lo que la adaptabilidad es la gran función de la materia viva. Y supera la selección cultural lo que es suficientemente creativo, por lo que la creatividad es la gran función de la materia culta. Estabilidad, adaptabilidad y creatividad se suceden y superponen. Un ser vivo puede sacrificar su estabilidad en favor de una eventual adaptabilidad y un ser culto su adaptabilidad en favor de una posible creatividad.

Ahora bien, toda gran función está servida a su vez por funciones más específicas (cuesta llamarlas subfunciones o funciones menores), según sean las alternativas disponibles. Por ejemplo, a la gran idea

de seguir vivo (gran función de la materia viva) sirve cierta variedad de posibilidades a modo de funciones parciales: anticipar mejor la incertidumbre u, otra alternativa, moverse mejor u, otra más, mejor tecnología. La inteligencia, la movilidad o la tecnología son subfunciones de la adaptabilidad. Y cada una de estas subfunciones tiene las suyas a su vez, y así sucesivamente con toda una gama de gamas de funciones. Dentro de la anticipación, por ejemplo, se puede ganar independencia mejorando la inteligencia o el sistema inmunológico. Dentro de la movilidad, otro ejemplo, uno puede optar por nadar o dejarse llevar a la deriva. Y dentro de la natación uno puede optar por la propulsión a chorro, como los calamares, a golpe de aleta caudal, como los peces, o por la propulsión a hélice con motor iónico y flagelo como tantos microorganismos. Y dentro de los peces están las alternativas de viajes a grandes distancias, como los atunes, o las excursiones de cercanías, como los peces de arrecife. Etcétera.

He aquí una buena intuición, creo, para plantear lo que podríamos llamar una teoría general de la forma y, por extensión, de cualquier otra propiedad de los objetos y fenómenos reales. Se trata de un mapa ordenado de las funciones que explican el acceso, la permanencia y la frecuencia de una forma en la realidad del mundo. Es todo un plan de investigación que requiere muchas actividades intermedias, como buscar modelos, mecanismos, leyes o grandes principios... pero cuya expresión última sería ese panorama jerarquizado de unas funciones paralelas o alternativas en la dirección horizontal que también pueden derivarse unas de otras, de función en subfunción, en la dirección vertical.

La consideración de la ley general del cambio comentada en el capítulo séptimo puede ser una buena forma de empezar. En efecto, la estabilidad de la materia inerte (y sus respectivas funciones y subfunciones) tiene una especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia pasiva. La adaptabilidad de la materia viva (y sus funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos llamado independencia activa. Y la creatividad propia de la materia culta (y sus correspondientes funciones y subfunciones) tiene especial correspondencia con lo que hemos dado en llamar independencia nueva.

En la ley general del cambio de un objeto inerte, los términos cruzados (anticipación y acción) son prácticamente nulos, por lo que la com-

plejidad del objeto tiende a coincidir con la complejidad de su entorno. El objeto sigue con mayor o menor inercia los caprichos de su realidad inmediata. Lo que hace es resistir. Las fronteras no son del todo nítidas, y ya hemos comentado que muchas formas vivas en la frontera justamente del no vivir (hibernación, letargo...) se acercan mucho a esta estrategia. También aquí hay varias alternativas donde elegir. La gran función es la estabilidad. Si hablamos de una propiedad como la forma geométrica de un gran cuerpo celeste, como una estrella o un planeta en condiciones de isotropía, entonces la estabilidad obliga a la forma esférica, que es también la más frecuente, la que más se observa. Si hablamos de la posición que ocupa una roca en la ladera de una montaña, desprendida de un estrato más alto, entonces resulta que tal posición no es independiente del tamaño de la roca. Cuanto mayor sea la roca, mayor será la probabilidad de alcanzar las cotas más bajas de la ladera. La roca gana estabilidad cuanto menor sea la pendiente y, en general, cuanto más cerca se encuentre de su situación de mínima energía potencial.

Existen objetos que existen poco. Es decir, existen objetos que no resisten las fluctuaciones de la incertidumbre del mundo, así que, sencillamente, se transforman o desaparecen. Tales objetos no son estables y, por lo tanto, tampoco son muy observables y no trascienden demasiado en la historia del universo. Un cubito de hielo tiene serias dificultades para mantener su identidad como cubito en una copa a pleno sol. El mismo cubito lo tiene mejor en la Antártida. Otros objetos existen algo más. Son objetos que han superado una larga historia de fluctuaciones de la incertidumbre de su realidad inmediata. Es decir, han superado una larga sucesión de selecciones fundamentales, o sea, gozan de cierta estabilidad, la suficiente para trascender en su mundo. Es el caso de la molécula de agua en nuestro planeta. El conjunto de las leyes de la física, y la incertidumbre que éstas permiten, empujan a estas moléculas a formar complejos de distinta índole, copos de nieve, agua líquida, vapor... En las condiciones de nuestro planeta (no así por ejemplo en el centro del Sol) la molécula de agua supera con creces cualquier selección fundamental, es una molécula estable, muy estable... Es estable porque soporta una amplia gama de incertidumbres exteriores sin dejar de ser por ello una molécula de agua. La molécula puede cambiar de estado, puede adquirir más energía, pero

sigue siendo una molécula de agua formada por un átomo de oxígeno enlazado con dos de hidrógeno. De hecho, la molécula sigue mansamente los cambios exteriores, pero es estable en el sentido de que no deja de ser una molécula de agua.

Algo similar puede decirse de los objetos vivos respecto de la independencia activa y de los objetos cultos respecto de la nueva independencia. Para superar la capacidad de resistir el entorno de la materia inerte y acceder a la capacidad de modificarlo, se necesitan los cuatro términos de la ley general del cambio. Siempre existe una frontera en la que se (con)funden las cosas. Es el comportamiento prácticamente inerte de las semillas del mundo vegetal o el comportamiento prácticamente vegetal de algunos animales. Pero por independencia activa, los animales, que no los vegetales, explotan su particular capacidad de movilidad de tecnología y de anticipación. Por nueva independencia, en cambio, se escalan los grados de esas mismas prestaciones.

Los individuos cultos, por su parte, superan la capacidad de modificar el entorno para acceder a la capacidad de crearlo provocando cambios de identidad. Aquí también las fronteras se desdibujan en las inmediaciones de ambos lados. Por el lado de la vida, por ejemplo, la evolución se hace creativa renunciando, de vez en cuando, a ciertas identidades (por simbiosis, por ejemplo). Por el otro lado no hace falta buscar mucho para encontrar ejemplos de cultura adaptativa, bien cómoda y asentada en sus identidades y tradiciones. Casi todas las identidades colectivas humanas se imponen estos límites, el folclore, la identidad nacional, religiosa, deportiva... Incluso manifestaciones tan genuinas de la creatividad como el arte o la ciencia tienen problemas para liberarse de su componente adaptativa.

En esta realidad, que es la que es, y no otra

Todo parece preparado para intentar una teoría de la forma. He aquí las ideas básicas.

Primero, usamos la matemática para nombrar las diferentes formas. No es una casualidad que las formas matemáticas más observables en la naturaleza sean ya, por ese mérito, palabras del lenguaje común: esferas, parábolas, rectas, hexágonos...

Segundo, el resultado de la actividad de las tres selecciones (la fundamental, la natural y la cultural) es, nada menos, la propia realidad, la realidad a la que pertenecemos, la realidad que observamos. Y la realidad es la que es. Podría ser otra, pero no lo es.

Tercero, y resulta que, en esta realidad, que es la que es y no otra, encontramos formas muy cercanas a las formas que nítida y abstractamente define la selección matemática.

Cuarto, la frecuencia con la que se observa una forma matemática particular en la realidad de este mundo se mide por el número de objetos reales que la comparten.

Y quinto, basta un vistazo a la realidad de este mundo, que es la que es y no otra, para constatar que las formas matemáticas presentes en ella no son equiprobables.

Dicho brevemente: en la naturaleza se observan formas matemáticas sencillas como esferas, hexágonos, espirales, hélices, parábolas, conos, ondas, catenarias, fractales... Sin embargo, parece que con distinto peso de su presencia. Se diría por ejemplo que, a primera vista, las esferas son más frecuentes que las parábolas. Ahora, armados con el esquema conceptual que nos hemos regalado, nos disponemos a replantear la cuestión. Nuestro plan para comprender la forma se centra en dos preguntas:

¿Qué formas son las más frecuentes en la naturaleza? ¿Cómo se comprende que sean esas formas y no otras?

La historia de la comprensión en ciencia es más la historia de las preguntas que la historia de las respuestas. Buscar preguntas suele ser un camino cuesta arriba, encontrar respuestas es iniciar el camino cuesta abajo. Lo que queda del libro es una propuesta de respuesta a estas dos preguntas. Responder a la primera pregunta supone un vasto ejercicio de observación en los mundos inerte, vivo e inteligente. Y ello sin olvidar la realidad directamente inaccesible a nuestro sensorio, el mundo invisible por pequeño, el invisible por grande o por lejano, y el invisible por complejo. Responder a la segunda significa concentrar la atención en las formas compartidas por el mayor número de objetos distintos y bucear luego en las funciones y subfunciones asociadas a la emergencia y la perseverancia de tales formas. Parece un buen plan de

morfogénesis. En la segunda parte de este volumen nos proponemos sólo un paseo ligero a través de las formas simples más frecuentes y de sus funciones más visibles. ¡Por algo lo son! Quizá sea suficiente para convencer a alguien más paciente, preparado y riguroso para seguir el camino de esta propuesta.

La tarea de revisar las formas de todos los objetos del mundo parece en principio una proeza cósmica, sí. Pero de momento se trata de especular para una primera aproximación. Empecemos con la pregunta que sigue (y luego ya veremos qué hacemos):

¿Cuál es la forma matemática más probable en la naturaleza?

A lo mejor resulta que la respuesta salta tanto a la vista que ni siquiera se requiere montar una investigación demasiado aparatosa. En efecto, basta entrar en un mercado, mirar el cielo de la noche con un telescopio, observar una arena vieja con el microscopio, bucear en el mar, entrar en una tienda de regalos, atender al tráfico rodado o a la arqueología industrial o, sencillamente, darse una vuelta por el campo, para constatar que el primer premio de frecuencia se lo lleva la simetría circular. Se diría que para esta afirmación no hace falta una exploración demasiado exhaustiva y sistemática de la naturaleza. La simetría circular reina a sus anchas en todos los dominios de la realidad.

Los mecanismos de la emergencia de la esfera ya han asomado en diversos puntos de esta reflexión y volveremos a ello en el próximo capítulo. Tampoco será difícil apostar por la función fundamental y natural que hace comprensible su presencia en el mundo inerte y en el mundo vivo. ¿Y luego? ¿Cuál es la segunda forma más probable? ¿Y la tercera?...

Ante nosotros tenemos dos preguntas: ¿cuáles son las formas más probables en la realidad de este mundo? ¿Cuáles son, en cada caso, las funciones fundamentales, naturales y cultas más convincentes? A estas dos preguntas daremos nueve respuestas que adelantamos aquí sucintamente: la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, el ángulo penetra, la onda desplaza, la parábola emite y recibe, la catenaria aguanta y los fractales colonizan.

Es el sumario de la segunda parte.

Epílogo de la primera parte
Inacabando...

No hay nada como un epílogo para inacabar un libro. El esquema conceptual en él construido se apoya en tres pilares: la materia inerte conducida por la selección fundamental, la materia viva conducida por la selección natural y la materia culta conducida por la selección cultural. ¿Eso es todo? Un esquema conceptual abierto sigue insinuando ideas por extensión y por simetría. Por ejemplo: ¿qué viene después de la selección cultural? ¿Se puede hablar de un cuarto tipo de selección?

Procedamos por extensión. El actor principal de la selección cultural (el individuo relevante) es el organismo dotado de conocimiento abstracto. Preguntarse por el siguiente tipo de selección equivale a preguntarse por el siguiente tipo de individuo. ¿Cuál sería el siguiente? Procedamos por simetría. La individualidad formada por organismos dotados de mente pensante es una colectividad humana dotada de una especie de mente colectiva. Es una mente colectiva que toma decisiones en favor de la nueva individualidad, una individualidad dotada de una especie de identidad, una identidad que merece perseverar a pesar de las fluctuaciones de la incertidumbre. Tal es el nuevo concepto emergente, la identidad colectiva. El ser humano es un organismo culto con gran tendencia a crear identidades colectivas: familias, tribus, etnias, naciones, religiones, clubes deportivos, clubes selectos, clubes gastronómicos, clubes, conventos, sectas, pueblos, barrios, ciudades, culturas... Se diría que en el mismo instante en el que dos mentes descubren que sintonizan (sencillamente, se caen bien), ya empieza a gestarse una nueva identidad colectiva...

Los conceptos y preguntas caen ahora como fruta madura. Tras la selección fundamental, la selección natural y la selección cultural, es el turno ahora de la selección colectiva.

Las preguntas también se desgranan por simetría. ¿Cómo se toma una decisión colectiva? ¡Buena pregunta! ¿Quién vela para que sea en beneficio de la identidad colectiva? Buena pregunta. Pero en la nueva nervura de la realidad, el nuevo individuo vive entre individuos de la nueva nervura. Un ser humano se relaciona con otros seres humanos y una colectividad con otras colectividades. ¿Cómo afecta la perseverancia de la propia identidad colectiva a las identidades colectivas vecinas? Buena pregunta.

Es el origen de un antiguo y siempre nuevo problema: organizar la convivencia humana, la política. La ley general del cambio, comentada en el séptimo capítulo, ofrece ideas que quizá valga la pena tener en cuenta. Hablemos por ejemplo de una colectividad llamada nación. Hablemos de independencia nacional. Hablemos de una nación que contiene una o más nacionalidades y repensemos la cuestión de la independencia nacional. Hablemos de que la independencia puede ser pasiva, activa o nueva. O de cómo evoluciona la independencia. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de la identidad colectiva cuando ésta, inmersa en la incertidumbre del momento y del lugar, no encuentra salida. Hablemos de la conveniencia de sacrificar un poco de identidad. Mucha. Hablemos de sacrificarla toda, de las alternativas que se presentan cuando se enfrenta la identidad de un individuo con la de una o varias de sus colectividades. Hablemos del progreso colectivo. Hablemos de su relación con el progreso individual. ¿Se mantiene vigente la idea de progreso definida como la ganancia de independencia? Entonces, si una identidad gana independencia, ¿significa que alguna otra la pierde? No hay duda de que el concepto «parásito» resiste el tránsito de la colectividad simplemente viva a la colectividad culta. Pero lo mismo ocurre con la estrategia del pacto simbiótico.

Comprender la identidad colectiva obliga a explorar lo que las identidades colectivas más frecuentes tienen en común, sus conocimientos, sus memorias, sus conceptos, sus mitos, sus dioses, sus memes... sus tácticas y estrategias para perseverar en la realidad de este mundo, sus trucos, ¡sobre todo sus trucos!, o sea, sus himnos, sus símbolos, sus oraciones, sus liturgias... Un buen esquema conceptual proyecta sus conceptos hacia delante. Si la selección fundamental resiste la incertidumbre, si la selección natural la modifica y si la selección

cultural la anticipa, ¿qué es lo propio de la selección colectiva?, ¿cómo se enfrenta la colectividad a su propia incertidumbre? Si la garantía de la perseverancia en el mundo inerte es la estabilidad, en el mundo vivo es la adaptabilidad y en el mundo culto es la creatividad, ¿cuál es la garantía de independencia de las identidades colectivas humanas? Conviene repensar estas preguntas dentro del nuevo esquema conceptual. No sea que algo de todo esto pueda resultar de ayuda.

Segunda parte
La rebelión de las formas

10
La esfera protege...

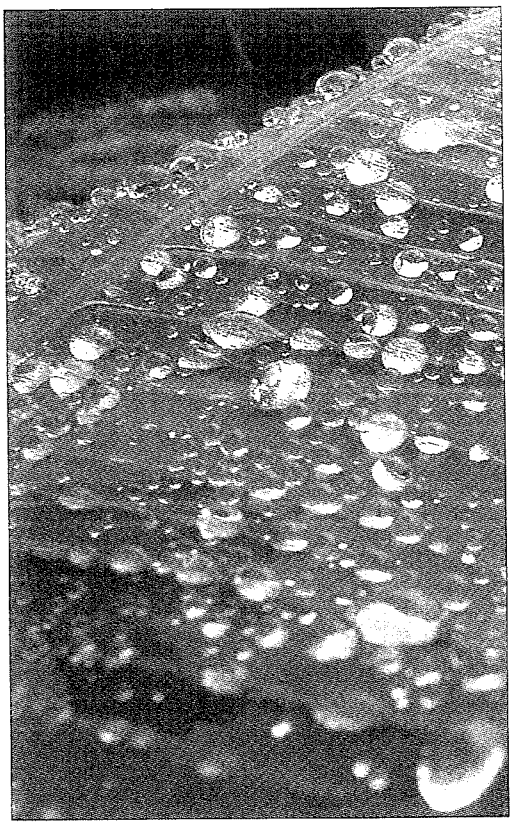


Figura 10.1. Gotas de agua sobre una palmera (fotografía del autor).

El mundo está bien provisto de circunferencias, círculos, esferas, esferas de esferas... La circunferencia es el perímetro más corto que encierra una superficie plana y la esfera es la menor superficie que encierra un volumen dado. La esfera emerge con facilidad, por selección fundamental, en un mundo inerte con pocas restricciones. Por ejemplo, cuando no hay restricciones en el espacio, es decir, cuando no hay direcciones privilegiadas, cuando todas las direcciones son igualmente probables, se dice que existe isotropía. Cuanto más homogéneo e isótropo es el espacio de la realidad preexistente, más probable es la emergencia de esferas. El espacio que más cumple esas condiciones es la nada. Por eso, la emergencia de esferas es especialmente probable en realidades jóvenes, poco pobladas de fenómenos y de objetos preexistentes.

Lo sabe bien un astronauta cuando vierte el agua de una botella en condiciones de ingravidez (la gravedad rompe la simetría); lo sabe bien el que contempla las gotas de rocío o las gotas de agua sobre una hoja de palmera después de la lluvia (figura 10.1), lo sabe bien el geólogo que contempla la redondez de una bomba volcánica y se imagina la masa de lava ardiente escupida por un volcán enfriándose durante el breve intervalo de condiciones de isotropía de la caída; lo sabe bien un submarinista que espira burbujas bajo el mar y el que tira una piedra a un estanque de aguas tranquilas; lo sabe bien el que fabrica perdigones dejando caer gotas de plomo líquido en el vacío, o el visitante de nuestra exposición de las formas en el museo cuando, pisando un pedal, observa el nacimiento de enormes burbujas (figura 10.2), también lo sabe el físico que estudia el nacimiento de estrellas y planetas... Todos estos sencillos experimentos muestran con qué alta probabilidad la selección fundamental permite la generación de simetrías circulares. La sensación de inteligibilidad es intensa cuando se piensa que el mismo *cómo* se aplica a la esfera de un gigantesco y viejo planeta como Júpiter orbitando en torno al Sol y a la esfera de una modesta burbuja ascendiendo según la vertical en una copa de cava.

El ámbar es resina fósil, un bellísimo material, transparente y dorado, capaz de atrapar el pasado. Entre otras cosas, y para deleite de los paleontólogos, es capaz de conservar insectos y fragmentos vegetales durante millones de años. Pero no sólo eso. También es capaz de convertir en semieternos objetos tan frágiles y efímeros como gotas

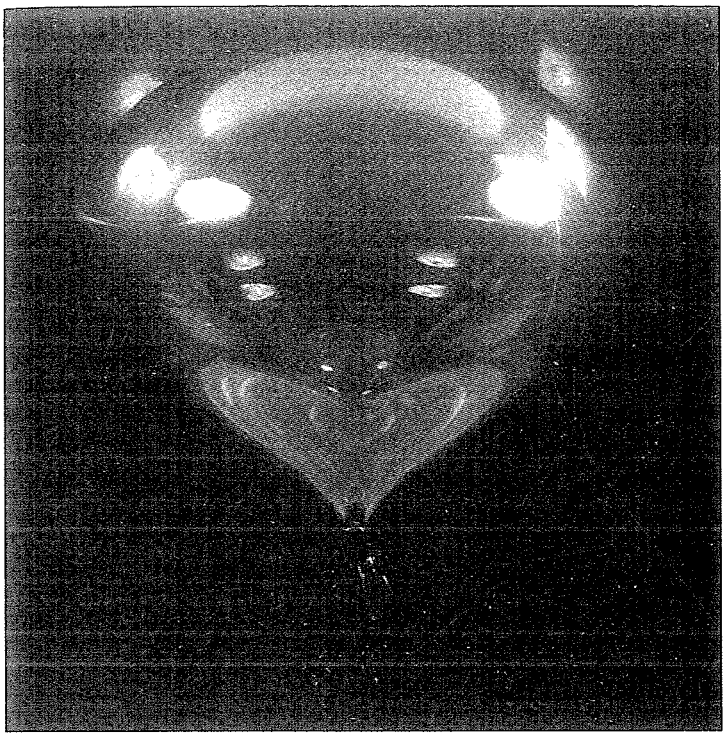


Figura 10.2. Burbuja de aire en el agua. La forma esférica se adopta por selección fundamental. Es la mínima superficie que encierra un volumen (colección MCFLC, fotografía de Sergio Parra).

de agua en el aire y burbujas de gas en el aire. Las termitas, por ejemplo, generan una gran variedad de burbujas esféricas. Poco después de quedar atrapadas por la resina mueren por asfixia. Y a veces, como en la figura 10.3, la presión sobre el cuerpo del insecto hace visible para siempre el último suspiro a modo de una gota de aire (en resina) señalando la posición exacta de cada espiráculo. Los microorganismos que ayudan a que las termitas puedan digerir la madera tardan bastante más en morir y sus restos están aún presentes en los líquidos y gases de descomposición del individuo.

—¿Por qué no te llevas una pieza del museo y los estudias? —le propuse a Lynn Margulis durante una cena en Barcelona—. ¿Por qué no vas ahora mismo a buscarla? Yo te espero para el segundo plato... [47]

En la misma pieza puede observarse algo muy frecuente en termitas presas en ámbar: el gas atrapado dentro de una burbuja esférica se mueve dentro del líquido atrapado dentro del cuerpo de la obrera atrapada en la resina. La esfera de gotas y burbujas es la forma de objetos inertes más frecuente dentro de las piezas de ámbar.

Éstos son casos de simetría por omisión, pero también hay muchos casos de isotropía por acción. Es cuando la isotropía no se debe a la ausencia de asimetrías, sino cuando éstas son tantas y tan bien repartidas que hacen que la globalidad vuelva a ser de nuevo isótropa. Basta

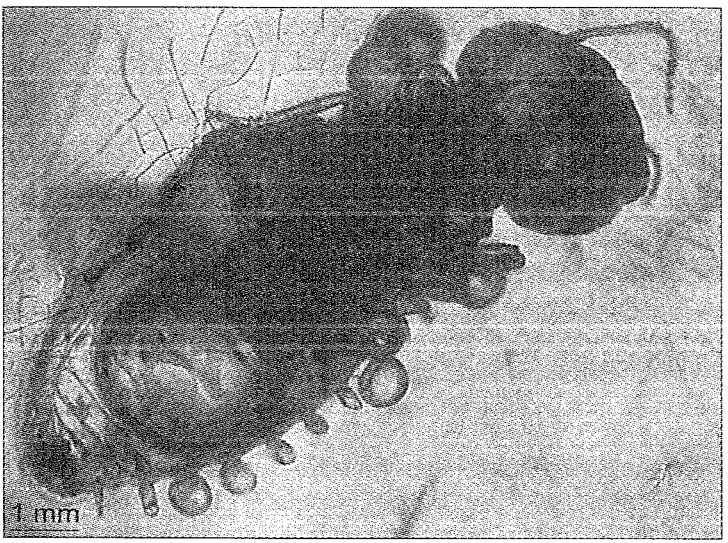


Figura 10.3. Termita *Electrodomenicus mastotermes* atrapada en ámbar dominicano (Mioceno). Una pequeña burbuja de aire señala la posición de cada individuo en lo que bien podría llamarse el «último suspiro». Además, una burbuja de gas se mueve en el líquido de descomposición atrapado dentro del cuerpo del animal. Otras esferas de la pieza corresponden a gotas de agua o a burbujas de aire (colección MCFLC, fotografía del autor).

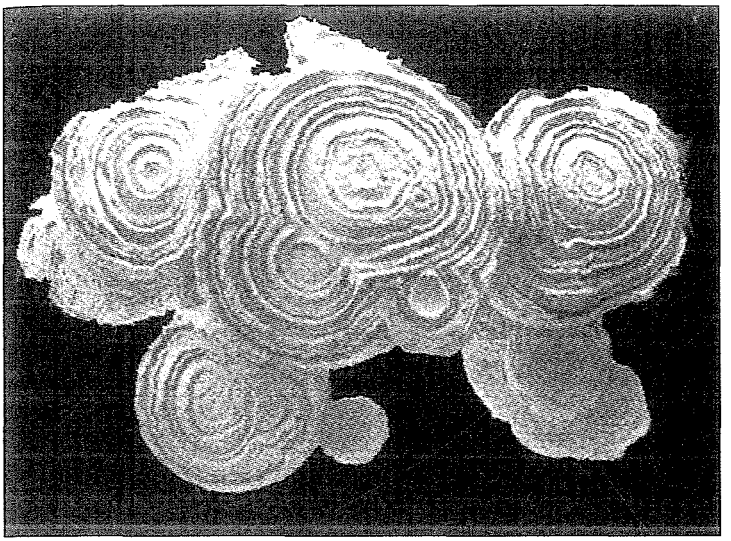


Figura 10.4. Oncolitos (¿?) de un desierto de Marruecos. La simetría esférica corresponde a un crecimiento isótropo de microorganismos sobre cantos rodados en capas sucesivas (colección MCFLC, fotografía del autor).

observar los cantos rodados de un río. La simetría circular no es tan rigurosa y universal como en las burbujas o los astros celestes, pero es sin duda la forma más probable (véase, antes, la figura 8.4b). Estas piedras han rodado tanto desgastándose las unas contra las otras en tantas direcciones diferentes sin privilegiar ninguna que, tras un tiempo largo, y el tiempo geológico sin duda lo es, la isotropía de las asimetrías es notable. Más espectacular aún es observar arena vieja en el microscopio. Los geólogos usan precisamente el grado de redondez de los granos para hacerse una idea de la edad de la arena.

En algunos casos el proceso se invierte y una forma esférica genera isotropía que, a su vez, da lugar a nuevas simetrías esféricas. Es el caso de los llamados oncolitos. Todo empieza con un canto rodado redondo sobre el que crecen microorganismos. La isotropía procede del hecho de que el canto rodado rueda. Rueda en cualquier dirección y, con el tiempo, acaba rodando en todas direcciones por igual. El resultado son

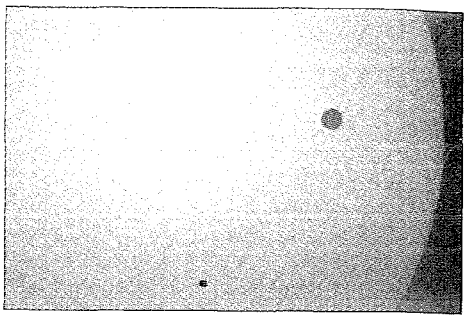


Figura 10.5. La esfericidad de estrellas y planetas. Tránsito de Venus por delante del Sol, el día 8 de junio de 2004, desde la terraza del Museu de la Ciència (fotografía del autor).

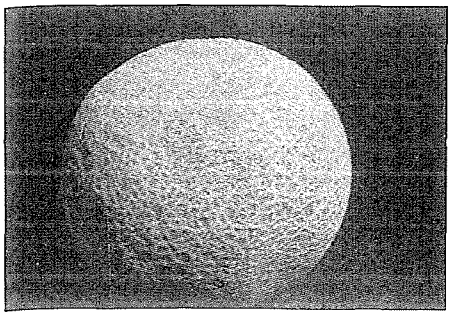


Figura. 10.6. Melón (fotografía del autor).

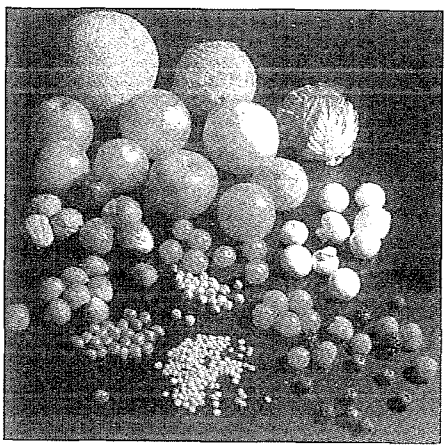


Figura 10.7. Selección de esferas limitada a 15 minutos en el mercado Galvany de Barcelona. La esfera es la forma más probable de frutos y semillas (fotografía del autor).

Figura 10.8. Medusoide fósil (Wisconsin, Estados Unidos) del tránsito del Precámbrico al Cámbrico (570 millones de años de antigüedad). Los primeros animales vivían en el agua en condiciones de isotropía. Estaban fijos o iban a la deriva. La movilidad rompe la isotropía con una dirección privilegiada: la del movimiento. Y así surge la simetría bilateral (colección MCFLC, fotografía del autor).

unas estructuras de capas esféricas concéntricas con un guijarro redondo en el centro de cada simetría. En un viaje a un desierto de Marruecos encontramos muchas formaciones en el cauce de un río antiguo que parecían oncolitos (figura 10.4). Lynn Margulis es una antigua y fiel amiga del museo que, de vez en cuando, se entusiasma con alguna pieza y nos ayuda a estudiarla. En una ocasión, una pieza de ámbar del museo, con inclusiones de termitas y de burbujas de gases de la descomposición, dio lugar a una interesante investigación interdisciplinar [47]. Una exposición es una actividad científica como otra y no hay actividad científica bien hecha que, tarde o temprano, no sugiera una investigación. El presunto oncolito está en plena investigación desde hace años. Lynn ha enviado muestras a todos sus amigos geólogos. Todavía no tenemos pruebas concluyentes para identificar la pieza. La duda está entre un origen orgánico (oncolito) o un origen puramente geológico. Un museo puede exhibir su ignorancia, siempre provisional, sin problemas. Algún día conoceremos el mecanismo concreto. De momento estamos ante un caso más de simetría esférica debida a alguna clase de isotropía por selección fundamental.

Lo dicho, la esfera emerge con facilidad en el mundo inerte. Es la forma más simétrica y es especialmente estable en ambientes isótropos, homogéneos, simétricos... En tales condiciones la selección fun-

damental la favorece, de modo que el mundo inerte se llena de esas formas tan perfectas. Es el turno de la siguiente selección, la selección natural. En efecto, la simetría circular también se prodiga con insistencia en el mundo vivo: las frutas, las semillas, los huevos, los primeros animales como los erizos, las medusas, ciertas esponjas... Basta plantarse delante de un puesto de frutas de un mercado cualquiera, para convencerse de la superioridad de la esfera (figuras 10.5, 10.6 y 10.7) en materia de frutas y semillas. Sin embargo, ahora la función no es la estabilidad.

Lo que se produce en un volumen interior (calor, materia, información, etcétera) sale al exterior atravesando una superficie (o, inversamente, lo que entra desde el exterior atraviesa una superficie para repartirse por un volumen interior). Si esa superficie frontera es mínima (la esfera), entonces el flujo entre el interior y el exterior se ralentiza. Es el efecto contrario de un radiador doméstico encargado de calentar una habitación lo más rápidamente posible. Este detalle termodinámico se convierte así en una función que hace que muchas esferas vivas sean comprensibles. Pero no es el único.

Para empezar, hablemos de animales, de animales del principio de la animalidad. Todo empezó en el agua. Y en el agua, donde la asimetría de la gravedad suele anularse con el empuje de Arquímedes, y donde la absorción y la difusión amortiguan la de la luz, triunfa la simetría circular. Es el caso de los antiquísimos medusoides (figura 10.8). La isotropía se aplica muy especialmente para los animales fijos en una posición del espacio o que vagan a la deriva. En ambos casos, el acto de alimentarse es un episodio casual. El animal come simplemente cuando la partícula alimenticia resulta que choca con él. Todo va bien mientras haya suficientes partículas nutritivas vagando en el entorno inmediato. Pero si la incertidumbre del alimento aumenta, lo vivo entra en crisis. Un salto importante para vencer esta crisis se da con la movilidad (capacidad para cambiar de entorno en nuestra ley general del cambio). Con ella, el animal en cuestión pasa a tomar la iniciativa y si la partícula alimenticia no tiene a bien chocar con él, entonces el animal va ¡y se mueve en dirección a la partícula! Pero atención. Se acaba de romper la isotropía porque acaba de aparecer una dirección privilegiada, la del movimiento. Surge entonces la máxima simetría posible (la máxima esfericidad posible, si se quiere) teniendo

en cuenta que predomina una dirección particular. Es la simetría bilateral. Aparece ya en los erizos, que incrementan su movilidad cuando la boca (orificio inferior) tiende a la parte delantera al tiempo que el ano (orificio superior) tiende a la parte trasera. Este tipo de simetría de los animales «automóviles» ya no se perderá nunca más (en su aspecto básico) en la lenta pero tremenda escalada que el reino animal vivirá a través de los sucesivos logros de independencia. Digamos de paso que la movilidad necesita anticipación, por lo que una independencia puede generar otras independencias que la selección natural puede continuar bendiciendo. Para moverse hay que percibir el mundo exterior, interpretarlo y coordinar luego las decisiones motoras. Los animales con simetría circular, los animales con poca o ninguna movilidad perciben poco o nada y no tienen cerebro. Ni falta que les hace... Los animales con simetría bilateral, en cambio, inician la carrera de la inteligencia con entusiasmo. Es la capacidad estrella para anticipar la incertidumbre, la que llevará hasta la noción misma de conocimiento y, haciendo volar el comentario, hasta la noción misma de conocimiento científico, la forma de conocimiento que se propone, por oficio, anticipar la incertidumbre del medio.

Pero volvamos a las formas. Moverse en el aire o en el agua a según qué velocidades favorece las formas que generen menos turbulencias en el medio (las que menos contribuyan a generar incertidumbre en el medio). Emergen así otras formas de simetría bilateral derivadas de la esfera, como son las célebres formas aerodinámicas (o, más propiamente, fluido-dinámicas), las de tantos peces y pájaros. No así los insectos, que se desplazan a velocidades mucho menores. Algunos insectos incluso generan turbulencias para usarlas como método de vuelo. La selección natural distorsiona la frecuencia de esferas cuando las favorece en el mundo vivo.

Otro caso notable es el del ojo de los animales. El ojo es una parte muy importante del ser vivo. Sirve para captar información del entorno, y ello, a su vez, es imprescindible para anticipar la incertidumbre. La selección natural ha favorecido diferentes ojos esféricos: los de los vertebrados (un gato), moluscos (el pulpo), artrópodos (araña) e insectos (hormiga). En los vertebrados el globo ocular es eso, un globo, una esfera, el iris un círculo, dentro del cual hay otro círculo, la pupila... No sabemos bien cuántas veces ha intervenido la selección natural para

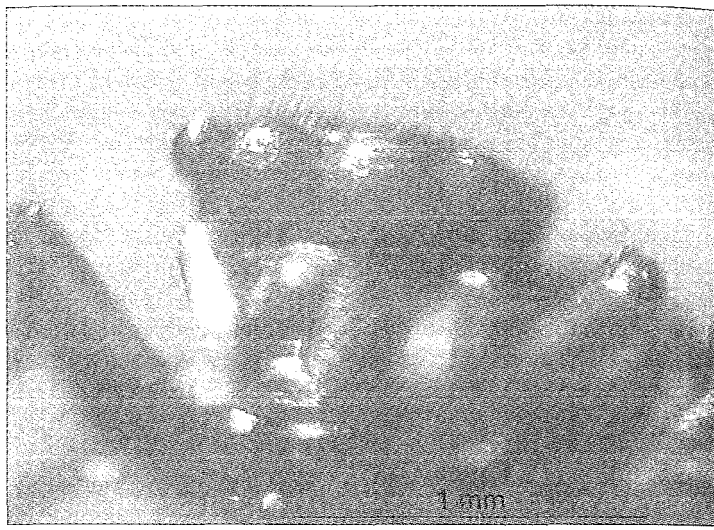


Figura 10.9. Ojos de una araña atrapada en ámbar dominicano (colección MCFLC, fotografía del autor).

reinventar la simetría circular del ojo. La isotropía de la simetría circular del ojo funciona de maravilla a la hora de escrutar la incertidumbre del paisaje. El caso de las arañas es más curioso: tienen cinco o más ojos y, a pesar de ello, no muy buena vista (figura 10.9). Tampoco es casualidad que la primera idea base para el ratón de ordenador fuese una esfera.

La copa de los árboles (el penacho de ramas y hojas) es también una parte trascendente de un individuo vivo. Un árbol en un entorno con luz suficiente e isótropa (en una latitud no lejana de los trópicos y sin sombra de otros vecinos) encuentra en la forma esférica un excelente captador de luz. Por eso en los trópicos domina esa forma para la copa de los árboles. Nótese algo curioso. Cuando dos árboles en esta situación están demasiado cerca el uno del otro, crecen de manera que tienden a construir, juntos, una sola copa esférica (véase la figura 10.10). Si se trata de una selva tropical con mucha competencia, entonces la simetría circular más favorable tiende al círculo. Para una luz

Figura. 10.10. Una misma encina vista desde dos ángulos diferentes: dos árboles demasiado próximos tienden a compartir una sola copa de simetría esférica (Calaceite, Teruel, fotografía del autor).

muy vertical y con competidores a los lados, lo más eficaz es una copa tipo boina. Para una luz muy oblicua, como ocurre en latitudes más próximas a los polos, la simetría circular se distorsiona y aparece una forma que capta mejor la luz por término medio: el cono. Es un nuevo estilo de copa de árbol que da nombre a una gran familia, las coníferas.

Ahora hablemos de huevos. Todos los animales empiezan su vida desde el concepto «huevo». Durante los primeros cientos de millones de años, el entorno natural de los huevos fue el agua (o sea, un medio con buena isotropía ambiental). Centremos nuestra atención en los huevos que, todavía hoy, se desarrollan en el agua, como los huevos de peces o los de las tortugas acuáticas. Su forma es la de una esfera casi perfecta. La esfera ya es altamente probable en el mundo inerte pero ¿por qué favorece la selección natural su permanencia? Si admitimos que la selección natural favorece todo aquello que mejora la independencia del objeto vivo, entonces digamos que la esfera ofrece como mínimo dos ventajas. Ya han asomado hace unas páginas. Por un lado, la esfera es la forma más difícil de morder por unas fauces cuyo diámetro sea comparable al de la esfera. No hay donde agarrarse bien. Sólo por eso el huevo esférico se libra de un buen número de enemigos (se independiza). Y no es poca ventaja si tenemos en cuenta la cantidad de comehuevos que rondan por todos los paisajes.

La redondez es, además, la mejor protección de todos los que tienen dificultades para huir ante una súbita amenaza (una alternativa a la movilidad). El escarabajo que entra en el hormiguero para robar inmaduros (la historia del «tuya-mía» relatada en el capítulo anterior) es,

para desesperación de los soldados, una semiesfera perfecta sobre la que resbala cualquier intento de recuperar la presa. Animales no esféricos con la misma dificultad para poner tierra de por medio adoptan la simetría circular cuando se ven en peligro. Es el caso de ciempiés, armadillos o erizos terrestres. La esfera es la referencia de todo caparazón rígido y la tendencia de toda protección articulada.

La otra ventaja de la esfera es la de ralentizar el intercambio de energías y materiales. Ya hemos comentado que es el huevo el que calienta a la gallina y que la esfericidad del huevo cumple, por forma, la misma función que la gallina, perder el calor despacio. Es también el sentido del concepto «acurrucarse». Pero la selección natural no tiene por qué detenerse en la esfera. Echemos un vistazo a las distorsiones posteriores más probables. En el agua todos los huevos son esféricos. Sin embargo, fuera del agua el entorno cambia. Cambia su incertidumbre y la nueva incertidumbre puede presionar para que la selección natural favorezca variaciones hacia otras formas. En efecto, fuera del agua, la madre puede tener más problemas de lubricación para expulsar el huevo y, sobre todo, fuera del agua el huevo puede rodar fácil y fatalmente fuera del nido. Es una desventaja (en otros casos, como la del escarabajo pelotero, claramente ventaja) de la esfera. La esfera sólo tiene un punto de contacto con una superficie plana. Allí se aplica el peso del huevo, y respecto de ese punto la esfera rueda fácilmente sin deslizarse. Tal es el inconveniente, la esfera rueda. Digamos que todos los huevos esféricos de un nido construido en un acantilado ya han tenido ocasión de estrellarse contra las rocas y no han dejado descendencia para contarlo. En cambio, cualquier distorsión desde el huevo esférico hacia el huevo de forma *ovoide* puede suponer una ganancia de independencia respecto de este tipo de accidentes. Un huevo ovoide ya no rueda en las infinitas direcciones posibles como lo hace una esfera, sino sólo en una, la perpendicular al eje de simetría. Pasar de infinito a uno es una mejora significativa...

Con el intercambio de materiales, como el agua, ocurre algo muy similar. En el desierto, por ejemplo, es muy importante conservar y administrar el agua al máximo. Por ello muchas especies de cacto tienden a la forma esférica, la forma que más retarda la pérdida del preciosísimo elemento. El cacto ya reduce la superficie de las hojas hasta convertirlas en espinas (volveremos sobre este caso a propósito de otra

forma simple emergente), y la tendencia de la planta a la esfericidad se explica con la misma idea. A veces se llega a situaciones de verdadera esquizofrenia de la forma porque, por un lado, la esfera interesa para no perder agua, pero, por otro, lo que interesa es la máxima superficie, por ejemplo para aprovechar al máximo los raros veinte minutos de lluvia que hay en todo el año. De nuevo la selección natural favorece un compromiso, como el que representa una forma esférica que minimiza la superficie recorrida por una profusión de contradictorios entrantes y salientes que tienden a maximizarla. Con algunos corales, como los caribeños corales cerebro, ocurre algo parecido aunque por otras razones. Algunos cactos no esféricos tienden a recuperar la forma de la esfera al agruparse en colonias. Es un caso de ganancia de independencia por asociación, porque aquí la protección contra la pérdida de agua o contra el exceso de insolación se consigue para el concepto «colonia». La emergencia de una nueva individualidad asoma por el horizonte. La arquitectura animal exhibe una gran profusión de simetrías circulares. Piénsese en el concepto «nido», ya sea un nido de pájaros o un nido de dinosaurios o en la entrada-salida de nidos y madrigueras. En el mundo vivo y en el mundo inteligente los agujeros suelen ser redondos.

A veces, la esfera escala los niveles jerárquicos y una población de esferas se reúne para dar lugar a una esfera mayor. Ocurre en el mundo inerte, en ciertas concreciones minerales, y también en diferentes y variadas situaciones del mundo vivo. Las arañas, por ejemplo, no sólo hacen huevos redondos, sino paquetes redondos de huevos redondos. El paquete de huevos es redondo por la misma razón que son redondos los huevos (figura 10.11). Algo muy similar ocurre con ciertos nódulos de marcasita (figura 10.12), ciertos frutos como moras y frambuesas (figura 10.13) y ciertas colonias esféricas de cactos esféricos.

En el mundo inteligente, la circunferencia, el círculo y la esfera también triunfan con claridad indiscutible. Sin embargo, la función que consagra la esfera no es tanto la protección. La arquitectura es un reductor animal de la incertidumbre ambiental. Se trata del término tecnología: cambiar el entorno para amortiguar las fluctuaciones de su incertidumbre. El llamado aire acondicionado se sitúa casi en el límite de esta idea: mantener dentro la temperatura constante, cualesquiera que sean los caprichos de la temperatura exterior. No hay duda. Una vi-

vienda amortigua las fluctuaciones de la meteorología. Bien pensado, cuanto más duras sean las condiciones exteriores de temperatura, por ejemplo, más apropiada sería la forma esférica (o parte de ella), ya que en un caso se trataría de no dejar escapar el calor interior (en el Ártico) y en el otro de no dejar que entre (en el desierto). Los iglúes de los esquimales se ajustan a la idea, pero extraña que la arquitectura popular del desierto o la tradicional mediterránea en particular y la arquitectura en general (siempre se trata de independizar el interior del exterior) prefiera usar las líneas rectas, salvo en solemnes cúpulas de iglesias, mezquitas y palacios y demás gestos en honor de la gloria humana. La omnipresencia de lo horizontal y vertical en la superficie del planeta, algún sentido no muy claro de lo racional, una noción sobria de la estética y una fuerte herencia euclídea, han impuesto la línea recta y el ángulo recto durante milenios. Las puertas y ventanas no son redondas como en la, digamos, naturaleza natural, sino rectangulares y en torno a la llamada proporción áurea. Corresponde a los arquitectos hacerse la pregunta: ¿no es demasiada línea recta en una naturaleza donde ésta destaca por su ausencia? Gaudí fue un arquitecto genial que se asoma aquí ahora por primera vez, pero cuya obra vamos a consultar a partir de ahora en cada una de las formas que proponemos. Tuvo, como veremos, una fuerte intuición científica a la hora de seleccionar las formas para su arquitectura.

Si la esfera triunfa en el mundo culto, no es tanto por la función protectora como por otra ventaja antes considerada como desventaja (el huevo fugándose del nido). La simetría circular ofrece interesantes alternativas de movimiento, de rotación de una figura en torno de un punto o de un eje. La circunferencia (el círculo, la esfera) rueda. Rueda sin deslizar para desplazarse, como la rueda de un carro, de un patinete, de una bicicleta, o rueda en torno de un eje fijo, como una noria o una turbina, como todo aquello que interesa que se mueva pero que no se pierda de vista. La simetría circular inteligente triunfa por rotación generando superficies de revolución. La idea del torno se inicia con la cerámica y acaba fabricando toda clase de piezas. Cualquier máquina de cualquier momento de la historia de la tecnología está repleta de circunferencias, discos y esferas y, en general, de piezas torneadas, piezas de simetría circular. Desmontemos, por ejemplo, un automóvil en todas y cada una de sus piezas. Y tomemos nota de todas las piezas

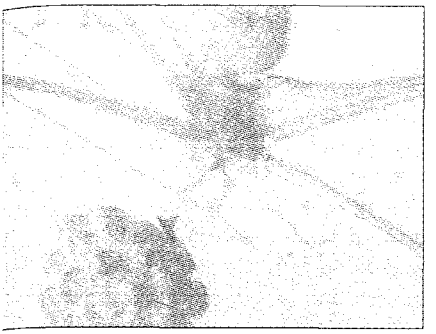


Figura 10.11. Paquete de huevos de araña en ámbar atrapado en el Mioceno, 20 millones de años (República Dominicana). Todos los huevos son esféricos o de origen esférico. En muchos casos similares, la selección natural favorece una esfera de esferas, un paquete esférico de huevos esféricos (colección MCFLC, fotografía del autor).

Figura 10.12. Nódulos de marcasita (Estados Unidos). Una esfera de esferas por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

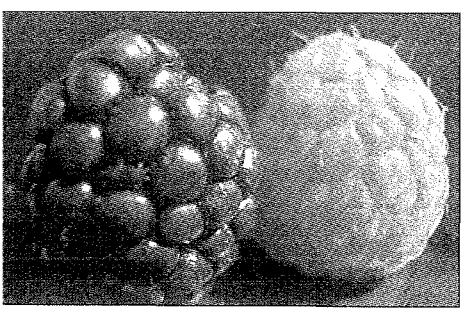


Figura 10.13. Mora y frambuesa (fotografía del autor).

con simetría circular, es decir, todas aquellas para las que existe una rotación que las deja invariantes (ruedas, engranajes, volantes, aros, arandelas, tornillos, cilindros, conos...). Lo cierto es que acabaríamos mucho antes si tomáramos nota de las piezas que no tienen esta simetría. No hay duda, el progreso de la movilidad humana se basa en la simetría circular. Un arquitecto, molesto por nuestra observación de la escasez de líneas rectas en la naturaleza, podría demandar aquí en justa venganza: ¿y qué planta o animal usa ruedas o su equivalente?

Pero ¿por qué no descubrieron nunca la rueda los incas? La idea de la rueda la tenían, con toda seguridad, porque producían cuentas circulares con un orificio perfecto en su centro para collares. Su tecnología para perforar con dos fresas cónicas por las caras opuestas era muy sofisticada. Obsérvese si no la extraordinaria colección privada de Ernesto Leichtenshneider (búsquesele en Lima, Perú). Hay trabajos que hoy son impensables sin la ayuda de la combinación de un láser y una computadora. ¿Cuántas cuentas se escapaban cada día rodando por el suelo del taller de uno de estos antiguos bisuteros? ¿Es posible que tantos indios geniales se resistieran ante una pista tan insistente sobre la definitiva aplicación de la simetría circular? Quizá nunca sepamos la respuesta, quizás hace falta más poder de abstracción del que pensamos para ver rodar una cuenta de collar y correr luego a casa del herrero para proponerle una revolución. Quizá, después de todo, la rueda no fuera tan útil en aquellos terrenos escarpados... Parece, eso sí, un buen misterio de la selección cultural.

En el mundo de la imaginación humana, la simetría circular es una metáfora en sí misma, un símbolo de la perfección, incluso de la divinidad. Estos fragmentos de «La esfera de Pascal», en *Otras inquisiciones* de Borges (1952), son una buena muestra:

> «Seis siglos antes de la era cristiana, el rapsoda Jenófanes de Colofón, harto de los versos homéricos que recitaba de ciudad en ciudad, fustigó a los poetas que atribuyeron rasgos antropomórficos a los dioses y propuso a los griegos un solo Dios, que era una esfera eterna. En el *Timeo*, de Platón, se lee que la esfera es la figura más perfecta y más uniforme, porque todos los puntos de la superficie equidistan del centro; Olof Gigon *(Ursprung der griechischen Philosophie,* 183) entiende que Jenófanes habló analógicamente; el

Dios era esferoide, porque esa forma es la mejor, o la menos mala, para representar la divinidad. Parménides, cuarenta años después, repitió la imagen ("el Ser es semejante a la masa de una esfera bien redondeada, cuya fuerza es constante desde el centro en cualquier dirección"); Calogero y Mondolfo razonan que intuyó una esfera infinita, o infinitamente creciente, y que las palabras que acabo de transcribir tienen un sentido dinámico (Albertelli: *Gli Eleati*, 148). Parménides enseñó en Italia; a pocos años de su muerte, el siciliano Empédocles de Agrigento urdió una laboriosa cosmogonía; hay una etapa en que las partículas de tierra, de agua, de aire y de fuego, integran una esfera sin fin, "el *Sphairos* redondo, que exulta en su soledad circular".

»(...)

»"Un Aristóteles no fue sino los escombros de Adán, y Atenas, los rudimentos del Paraíso". En aquel siglo desanimado, el espacio absoluto que inspiró los hexámetros de Lucrecio, el espacio absoluto que había sido una liberación para Bruno, fue un laberinto y un abismo para Pascal. Éste aborrecía el universo y hubiera querido adorar a Dios, pero Dios, para él, era menos real que el aborrecido universo. Deploró que no hablara el firmamento, comparó nuestra vida con la de náufragos en una isla desierta. Sintió el peso incesante del mundo físico, sintió vértigo, miedo y soledad, y los puso en otras palabras: "La naturaleza es una esfera infinita, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna". Así publica Brunschvicg el texto, pero la edición crítica de Tourneur (París, 1941), que reproduce las tachaduras y vacilaciones del manuscrito, revela que Pascal empezó a escribir *effroyable:* "Una esfera espantosa, cuyo centro está en todas partes y la circunferencia en ninguna"».

La simetría circular está tan presente en el arte, que casi no diremos nada. Sólo unas pinceladas. El 23 de noviembre de 1999 se inauguró en el Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona la exposición *Cosmos. Del Romanticismo a la vanguardia 1801-2001.* Los organizadores resumían así sus intenciones: «Percibir el Cosmos, estudiarlo, cuestionar cuáles son sus límites... han sido aspectos fundamentales tratados por las artes, la ciencia y la historia de las ideas de los úl-

timos dos siglos». Vale la pena recorrer el catálogo que ha quedado de esta muestra extraordinaria, [48] porque circunferencias, discos y esferas destacan claramente sobre las demás formas en las distintas pinturas, esculturas, fotografías y montajes.

No es difícil tropezarse con esferas de selección cultural. La imagen 10.14 está tomada a poco más de cien metros de mi mesa de trabajo. Como puede apreciarse, existe una línea de observación según la cual se observa la cúpula esférica del Observatorio Fabra amaneciendo por detrás de la cúpula esférica del planetario.

Maurits Cornelius Escher es un artista de fuertes intuiciones científicas. Su interés para *deformar* la realidad euclídea en una realidad de simetría esférica es una de las constantes de su obra. Contémplese, asimismo, la evolución de la obra de Muixart en los últimos tiempos. Recuérdese la Galatea de las esferas de Dalí y otros estudios en los que la esfera es el elemento de construcción (figuras 10.14, 10.15, 10.16 y 10.17). Visítese el Parque Güell de Antoni Gaudí, donde una formación de esferas de piedra da la bienvenida al visitante... o los bellos e inteligentes espectáculos de Pep Bou con burbujas de jabón (figura 10.18).

Veamos un último ejemplo. Existen objetos que se pueden encontrar en las tiendas de regalos y recuerdos de todo el mundo. Como esas cucharillas de café con el escudo de la ciudad o del paisaje del lugar.

Figura 10.14. La cúpula esférica del Observatorio Fabra *amaneciendo* por detrás de la cúpula esférica del planetario. Esferas por selección cultural (fotografía del autor).

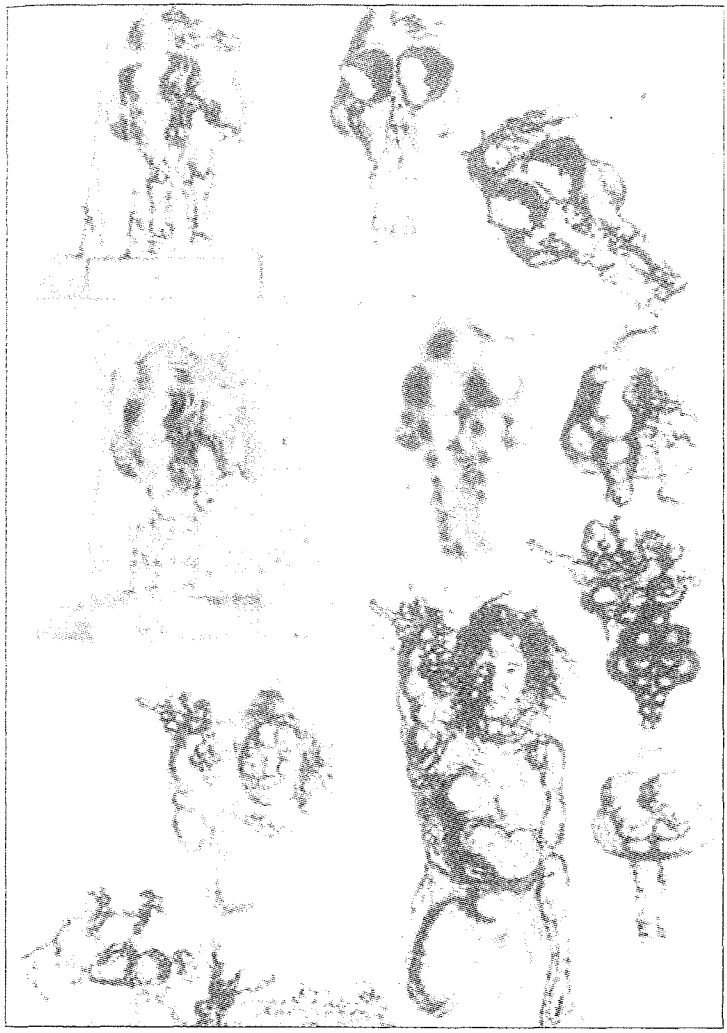


Figura 10.15. Dalí estudió la esfera como elemento generador de formas. Salvador Dalí, *Étude pour les environs de la ville paranoïaque-critique,* 1935. Tinta y lápiz sobre papel.

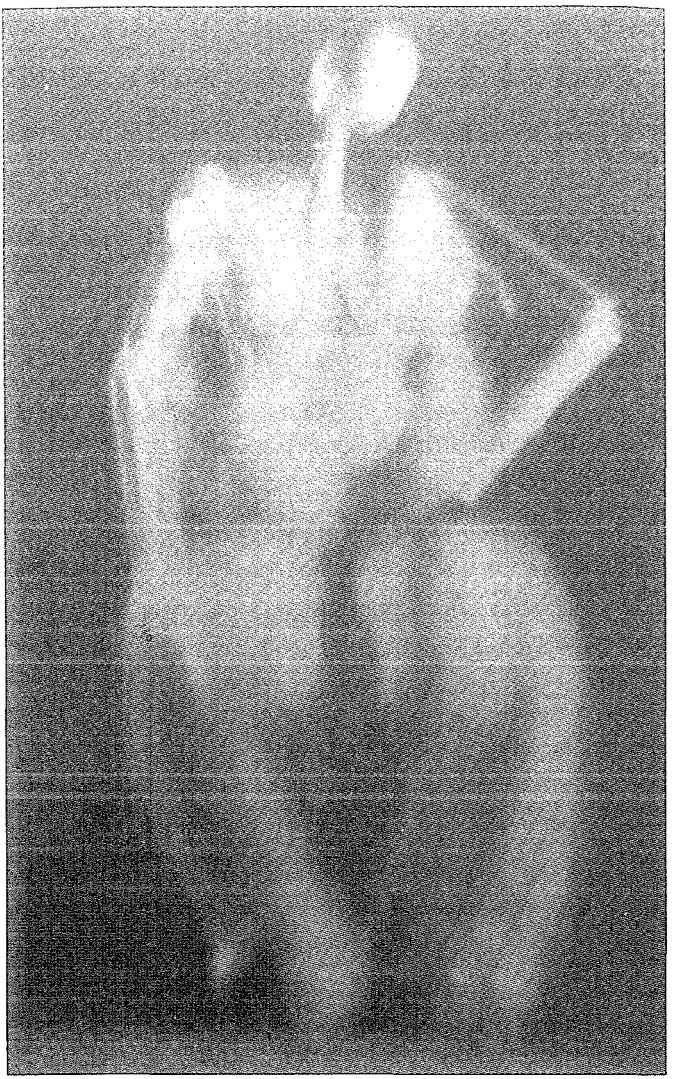


Figura 10.16. Dalí se mueve ante el obturador abierto de la cámara del fotógrafo con una esfera en la mano e inventa una figura.

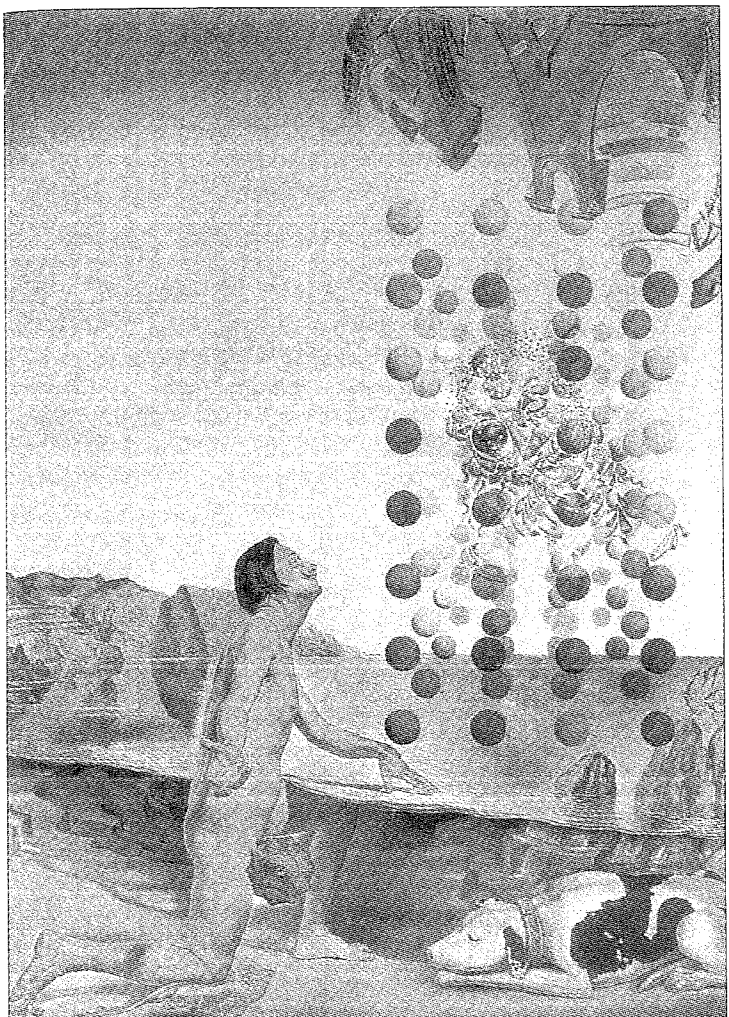


Figura 10.17. Dalí desnudo, en estado de contemplación delante de cinco cuerpos metamorfoseados en corpúsculos entre los cuales aparece, de repente, la Leda de Leonardo cromosomatizada por el rostro de Gala (1945).

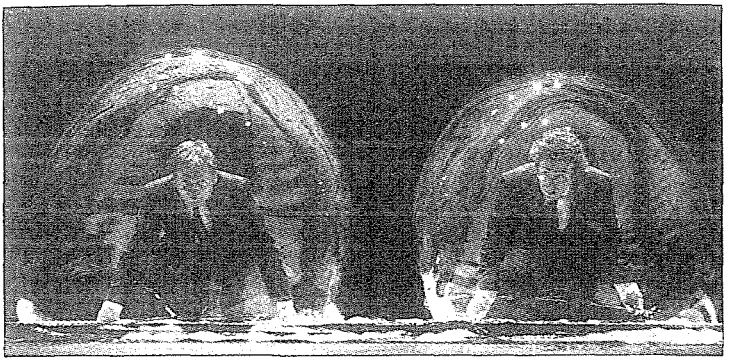


Figura 10.18. Pep Bou, el rey de las burbujas, y su colaborador Lluís Beiva, en sendas semiesferas cultas y efímeras (fotografía de Roberto Ramos).

¡Y esferas! Simplemente esferas. De todos los tamaños. De todos los materiales: cuarzo, cristal, resinas, plásticos, hierro, níquel, cobre, oro, plomo, madera, mármol...

En suma, la esfera emerge por isotropía en el mundo inerte. En el mundo vivo la esfera, sobre todo, *protege*. Y en el mundo culto *protege*, *rueda*, *genera*, *simboliza la perfección*... Todo eso, y no otra cosa, significa empezar a comprender la esfera.

11
El hexágono pavimenta...

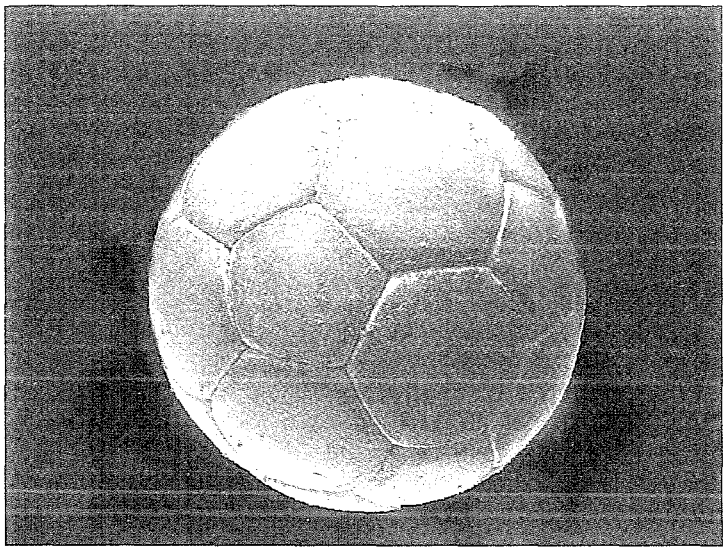


Figura 11.1. Balón de fútbol. Si el espacio disponible no es plano sino esférico, la mejor pavimentación se consigue con pentágonos rodeados de cinco hexágonos. De ahí tal vez el número cinco que surge en algunos equinodermos, como las estrellas de mar (fotografía del autor).

Acabamos de verlo. La simetría circular emerge con mucha facilidad. Esto es así porque la probabilidad es alta en ambientes uniformes e isótropos, porque tal es el caso de la nada y porque el universo está lleno de espacios llenos de nada. Esto es así también porque el agua en reposo es isótropa y uniforme y porque mucha es la cantidad de agua presente en el planeta.

Imaginemos ahora el fenómeno de la profusión de simetrías circulares restringida a un plano. Por ejemplo, las burbujas de la espuma de un detergente tienden a ser esféricas en el espacio de tres dimensiones. Sin embargo, si constreñimos una solución jabonosa entre dos vidrios planos, tendremos ante nosotros burbujas circulares de diámetro parecido compitiendo entre sí por ocupar el espacio plano disponible (figura 11.2). Una burbuja sin otras vecinas en su entorno inmediato presentará una forma de disco perfecto. Si la población de burbujas vecinas aumenta, cada disco tenderá a rodearse de hasta otros seis discos tangentes. El plano tenderá entonces a llenarse de círculos. Sólo quedarán libres unos característicos intersticios entre los puntos de tangencia. Pero atención: si la presión de la población de círculos sigue creciendo, el espacio *perdido* de los intersticios tenderá a desaparecer porque los círculos se deforman hasta que el plano queda perfectamente pavimentado con una nueva forma emergente: el hexágono.

En el experimento de las pompas planas de jabón se pueden observar todas las formas intermedias que van desde el círculo perfecto hasta el hexágono perfecto. La isotropía daba el círculo; la presión isótropa, el hexágono. La palabra clave ya ha surgido y nuestro esquema conceptual nos permite reconocerla y valorarla para afirmar solemnemente que ya hemos dado con la función fundamental: el hexágono pavimenta.

Cuando el origen del fenómeno está en una superpoblación de círculos, es fácil constatar que el hexágono pavimenta. Basta tomar un puñado de cigarrillos (o cualquier conjunto de cilindros blandos) y apretarlos suavemente los unos contra los otros. Al poco, los cilindros se habrán convertido en prismas hexagonales (figura 11.3).

En el mundo inerte se pueden encontrar bellas pavimentaciones hexagonales. La más espectacular es sin duda la llamada convección de Rayleigh-Bénard [49]. Se trata de un curioso fenómeno descrito por primera vez en 1790 por Benjamin Thomson. El longevo Henri Bénard

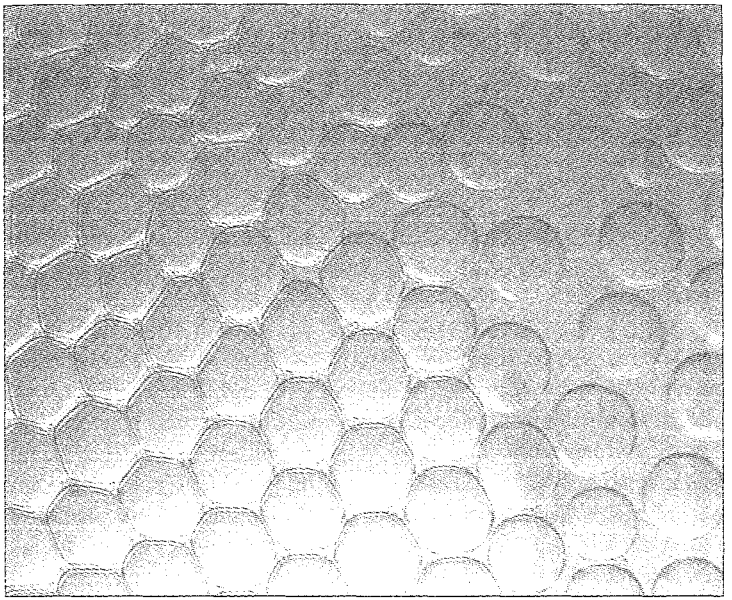


Figura 11.2. La competencia de los círculos por el espacio plano genera hexágonos. Son hexágonos por selección fundamental (colección MCFLC, fotografía del autor).

fue el primero en organizar una experimentación sistemática hacia finales del siglo XVIII, y el Nobel Lord Rayleigh el primero que lo explicó definitiva y convincentemente a principios del XX. Hacia los años setenta, los físicos de la termodinámica del no equilibrio lo adoptaron como ejemplo estrella de un nuevo concepto: la autoorganización de la materia (en lo que creo que es un ligero abuso de lenguaje). El interés del ejemplo reside, claro, en que se trata de un caso de autoorganización *no viva*. En realidad, se trata de una curiosa adaptación de la estructura de un líquido cuando se le calienta ligeramente por la parte inferior. El líquido del fondo se dilata al calentarse, con lo que su densidad disminuye y asciende. A medida que se acerca a la superficie libre, el líquido vuelve a enfriarse, con lo que su densidad aumenta y vuelve a hundirse. Así se crean unos rollos de circulación cuyo movi-

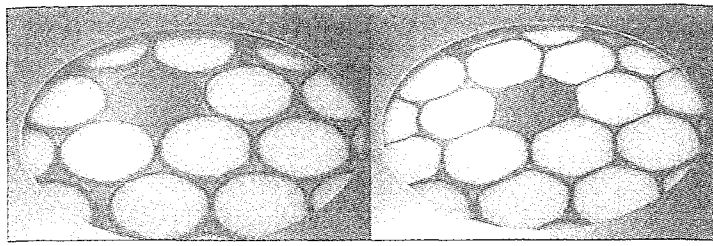


Figura 11.3. Los hexágonos invaden los intersticios que los círculos tangentes no pueden ocupar (colección MCFLC, fotografía del autor).

miento se opone a la viscosidad del líquido y a la tendencia de la conducción térmica a suavizar los gradientes de temperatura. En condiciones más o menos críticas, los rollos se aprietan en celdas hexagonales claramente visibles en la superficie del líquido. Según tales condiciones críticas, el fenómeno puede ser estable, inestable, incluso caótico. La constitución de esta realidad es más o menos compleja con sus leyes fenomenológicas (convección, conducción, turbulencias, tensión superficial, etcétera), sus fluctuaciones y sus inestabilidades. Pero cualquiera que sea el mecanismo de la nervura de esta realidad, se trata, para lo que aquí nos ocupa, de un bello ejemplo de emergencia de hexágonos por selección fundamental, cuya función es cubrir el plano, pavimentar.

Otros casos de hexágonos más imperfectos visibles en la materia inerte no se explican fácilmente a partir de una superpoblación de círculos. Es la bien conocida estructura de grietas en un terreno cuando se reseca o las figuras de luz que el sol crea en el fondo de una piscina (que tanto gustan al pintor inglés David Hockney). Otro caso muy espectacular lejanamente relacionado con los cuasihexágonos de una superficie de un paisaje seco (que una vez fue húmedo) es el paisaje de las columnas cuasihexagonales de basalto. El más bello y conocido es sin duda el de Antrim (Irlanda del Norte). Y no es el único caso. Castellfullit de la Roca es un originalísimo pueblo del Ampurdán (Girona, España) que se encarama sobre una gran roca de columnas basálticas hexagonales. En el museo tenemos, por gentileza de su Ayuntamiento, tres magníficas piezas que se desprendieron y cayeron al río (figu-

ra 11.4). Un corte perpendicular de las columnas verticales tiene, en efecto, el aspecto típico de una pavimentación muy próxima a la hexagonal. La tentación más inmediata es relacionar este caso con el de la convección de Raileigh-Bénard discutido más arriba. Un gradiente vertical de temperatura (como el que se creó en la lava del Terciario del caso irlandés cuando ésta entró en contacto con el aire) equivale quizás a un plato de aceite calentado debajo para crear las células de convección de Rayleigh-Bénard. La idea no es mala y hasta el año 2002 se podía sugerir como una posibilidad investigable. Pero en ese año apareció en *Physical Review* un modelo convincente de otro mecanismo bien distinto [50].

El proceso funciona más o menos como sigue: el enfriamiento de la lava provoca fuertes gradientes de temperatura, pero no para inducir el movimiento de partículas sino para fracturar las partes sólidas más superficiales. Estas fracturas tienden a propagarse hacia el interior del material y a formar figuras poligonales cada vez más regulares. Al final, el límite de más estabilidad corresponde a una configuración de mínima energía, la pavimentación cuasihexagonal que se observa en los paisajes de Antrim y Castellfullit. El proceso se parece mucho al caso de las grietas de desecación. Si la desecación es muy rápida, los polígonos son irregulares, como en las primeras capas de la simulación numérica de Jagla y Rojo. Sin embargo, cuando la desecación es lenta (la evaporación de un lago, por ejemplo), entonces los polígonos tienen tiempo de ir acomodándose a una situación de mínima energía. En el último capítulo, a la hora de hablar de las formas fractales, citaremos otro asombroso caso de hexágonos en la materia inerte: el de los copos de nieve. Aquí la forma última es fractal, pero lo es sobre una simetría hexagonal que también minimiza la energía. Los mecanismos de emergencia de estas estructuras hexagonales son distintos (compresión de simetrías circulares, propagación de fracturas, cristalización del agua...). Lo que tienen en común es la selección fundamental que los favorece en nombre de la estabilidad y su correspondiente función: pavimentar. He aquí la mayor inteligibilidad del, digamos, hexágono inerte. Cuesta emplear la palabra «función» para un objeto inerte, pero recordemos que en nuestro esquema conceptual hemos limpiado este término de toda connotación intencional o teleológica. Ni siquiera en el mundo vivo se puede hablar de este significado de función. Pasemos

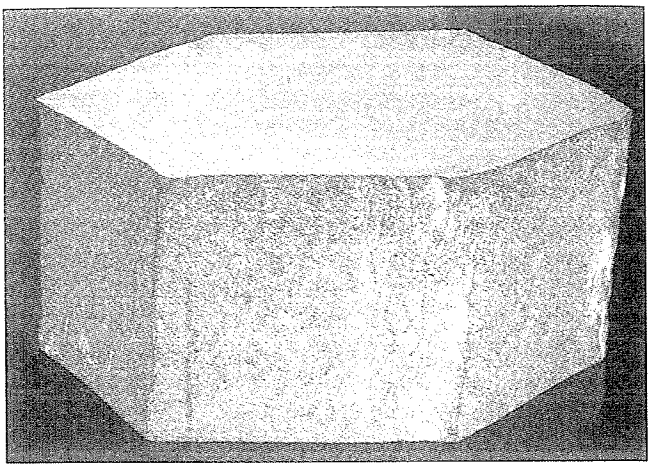


Figura 11.4. Columna hexagonal (por selección fundamental) de basalto de Castellfullit de la Roca (Girona, colección particular, fotografía del autor).

a la materia viva. Aprovechar el espacio es un concepto de alto interés en un mundo habitado por entes vivos. Por ello no es de extrañar que la función fundamental de pavimentar se sostenga muy bien como función natural.

En efecto, la naturaleza viva está trufada de hexágonos que pavimentan. Primer ejemplo: el ojo facetado de los insectos presenta una superficie pavimentada de hexágonos (figura 11.5). Nada más sencillo de explicar. El principal problema físico para fabricar un ojo consiste en que el objeto (que ver) forme una imagen en la retina del ojo del sujeto (que debe ver). Para ello, hay que conseguir que por cada rayo de luz emitido desde un punto del objeto llegue sólo un rayo a cada punto de esa especie de pantalla llamada retina. Eso es justamente lo que se consigue con el sistema de lentes de una cámara fotográfica. Sin su ayuda sería como exponer la película sensible directamente a la luz, no se formaría una imagen. El ojo de los vertebrados se basa en la misma idea de concentrar rayos con lentes. Sin embargo, los artrópodos apostaron por la solución más sencilla: el tubo. Un tubo es, en efecto, un seleccionador de rayos de luz: sólo pasan por el tubo los rayos que le

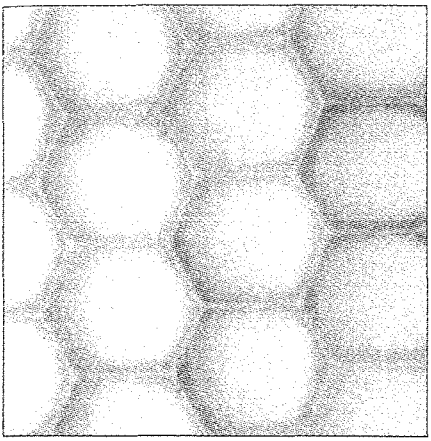


Figura 11.5. Pavimentación hexagonal del ojo de un insecto. Un hexágono significa un píxel en la imagen (colección MCFLC).

son paralelos. Pero atención: un tubo fabrica una imagen de una sola mancha de luz. Digamos, en el lenguaje actual, un tubo forma una imagen de un solo píxel. Un tubo, un píxel; dos tubos, dos píxeles; tres tubos, tres píxeles. El ojo de los artrópodos, y en particular, de los insectos, es un manojo de tubos que crean una imagen con tantos píxeles como tubos tiene el manojo. Y ya lo sabemos: cuantos más píxeles, mejor imagen.

La selección natural favorece la independencia del individuo, y en este caso esto significa la mejor imagen posible. Cuanto mejor se perciba el entorno, mejor se come y peor se es comido, menos se depende de las sorpresas que pueda deparar la incertidumbre del entorno, mejor se percibirá la posición de la partícula alimenticia por capturar, mejor se anticipará la amenaza de alguien que considere partícula alimenticia al propietario del ojo. O sea, que cuantos más tubos existan por unidad de superficie de ojo, mejor. En último término, siempre se puede dar un paso más sacrificando los intersticios de los cilindros. Así emerge algo que comparte la casi totalidad de los artrópodos (digo casi pero ni siquiera conozco una excepción): las facetas de los ojos hexagonales. Así pues, el hexágono pavimenta los ojos de los animales pluricelulares más frecuentes en la naturaleza. Son hexágonos de una perfección sublime (como se puede observar con la ayuda de una sim-

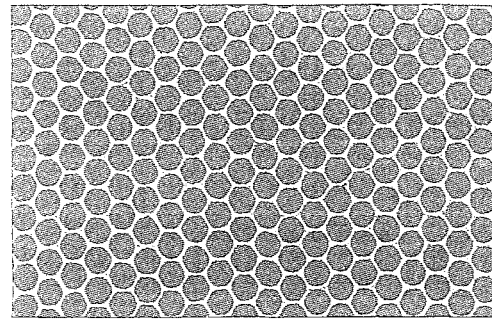


Figura 11.6. Celdas hexagonales de colmena de abejas.

ple lupa), de modo que en el caso del hexágono parece que pavimentar es tanto una función fundamental como una función natural. En efecto, el hexágono sigue pavimentando en el mundo natural incluso fuera del concepto «ojo».

Las celdas hexagonales de las abejas (avispas y otros himenópteros) son probablemente los hexágonos más conocidos de la naturaleza (figuras 11.6 y 11.7). Queda poco que comentar aquí. Estos insectos no tienen espacio que perder y mucho material (como la cera) que ahorrar a la hora de construir los presuntos cilindros originarios para alojar reservas y población inmadura. Así que ahí están los preciosos y rítmicos hexágonos. Pero en la naturaleza los hexágonos se encuentran pavimentando muchas otras superficies, sobre todo unas muy especiales y trascendentes: las que separan el interior del exterior de los indivi-

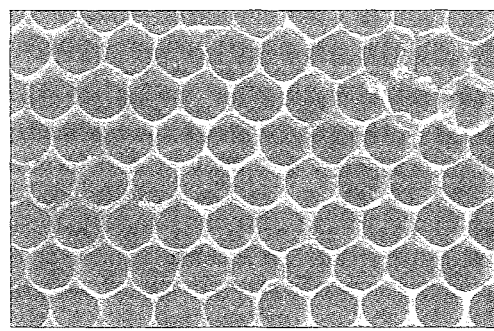


Figura 11.7. Disposición de celdas hexagonales en capas sucesivas de una colmena (fotografía de Sergio Parra).

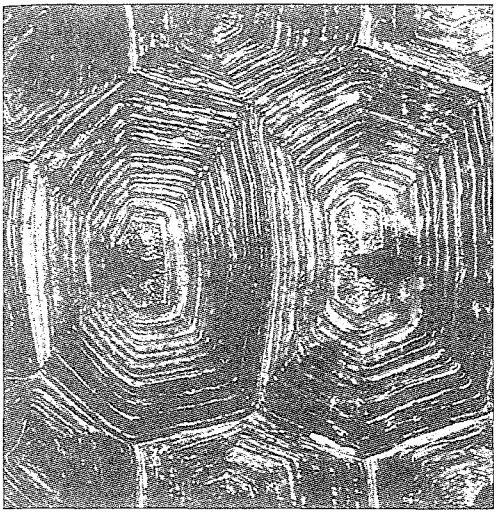


Figura 11.8. Caparazón de tortuga. Los hexágonos quizás empezaron siendo placas circulares por cuyos intersticios penetraban los dientes y las garras de los depredadores (colección MCFLC).

duos, la primera fila en contacto con la incertidumbre del medio. Son las pieles, las cortezas, los escudos, los caparazones... Obsérvense los caparazones de la mayoría de tortugas (figura 11.8): hexágonos. No son tan perfectos y homogéneos como los de un ojo facetado o un panal de abejas, pero son hexágonos. Si el origen de los hexágonos que pavimentan son placas circulares en competencia tangencial, se comprende que la selección natural favorezca la operación de eliminar los intersticios por donde podían colarse los afilados dientes de los depredadores. Pasar de un escudo de discos a un escudo de hexágonos es ganar independencia respecto de la incertidumbre de posibles depredadores. Obsérvense los caparazones de los armadillos y sus ilustres y gigantescos antecesores, los gliptodontes (figura 11.9). Obsérvense las pieles de tantos reptiles y peces. La piel del pez cofre no tiene desperdicio: no sólo presenta hexágonos sino hexágonos desconstruidos en triángulos isósceles, un caso que encontrará enseguida una sabrosa convergencia culta. Obsérvese la corteza de la celebrada piña tropical y de tantas otras cortezas vegetales. Son hexágonos que pavimentan, siempre hexágonos. Siempre pavimentando. En estos casos parece que no sólo se comparte la función natural, sino el mecanismo de comprimir simetrías circulares.

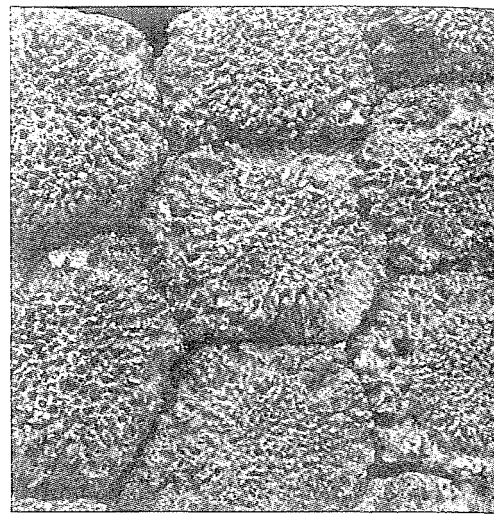


Figura 11.9. Caparazón de gliptodontes (colección de MCFLC, fotografía del autor).

Quizá valga la pena alejarse por un momento de la idea de pavimentar superficies planas. ¿Qué ocurre con la pavimentación de una superficie esférica? Acabamos de mencionar el ojo. Pues bien, si el ojo por pavimentar es esférico, la mejor solución no es exactamente una estructura hexagonal. La mejor manera de pavimentar matemáticamente una superficie esférica es utilizar pentágonos, cada uno de ellos rodeado (y compartiendo cada uno de sus cinco lados) con cinco hexágonos. La mejor pavimentación para una esfera es, llamémosla así, la pentahexagonal. Se trata de un icosaedro, el poliedro regular de veinte lados, truncado. Una pelota de fútbol de las de antes es un ejemplo de esta afirmación (véase, antes, la figura 11.1). No sé si los fabricantes llegaron a esta conclusión después de realizar una investigación (la mejor manera de construir una esfera a base de trozos cosidos de cuero) o si llegaron a ella por una especie de selección natural culta, pero ahí está la bella solución. En el mundo marino hay un curioso caso de pavimentación pentahexagonal de una esfera. Es el esqueleto de ciertos erizos de mar. Lo que sigue es una especulación que no tiene más base que la precedente. Aviso para anticiparme a un eventual abucheo mental del lector. Por preguntar que no quede: ¿tendrá algo que

ver el cinco de las cinco patas de una estrella de mar, otro equinodermo, con el número cinco que aparece en la pavimentación de un erizo?

El hexágono pavimenta por selección fundamental y pavimenta por selección natural. Y la selección cultural, ¿pavimenta con hexágonos? Las baldosas y los baldosines más habituales para cubrir suelos y paredes son hexagonales. Visítese una ferretería cualquiera. Las redes para mosquiteros y otros usos suelen tener estructura hexagonal, como las telas metálicas para jaulas o vallas. Algunas pavimentaciones urbanas son especialmente notables, como las diseñadas por Gaudí (¡otra vez Gaudí!), que pavimentan hoy todo el Paseo de Gracia de Barcelona (véase, más adelante, la figura 19.9). No es una casualidad. Es una consecuencia de la selección cultural. Obsérvese el parqué de madera, diseñado por el mismo arquitecto para los suelos del edificio de la Casa Milá (La Pedrera) en Barcelona (véase, más adelante, la figura 19.10). No creo que el carismático arquitecto tuviera nunca ocasión de observar la piel hexagonal de un pez cofre del mar Caribe, que, como acabamos de comentar, está también desconstruida en triángulos isósceles.

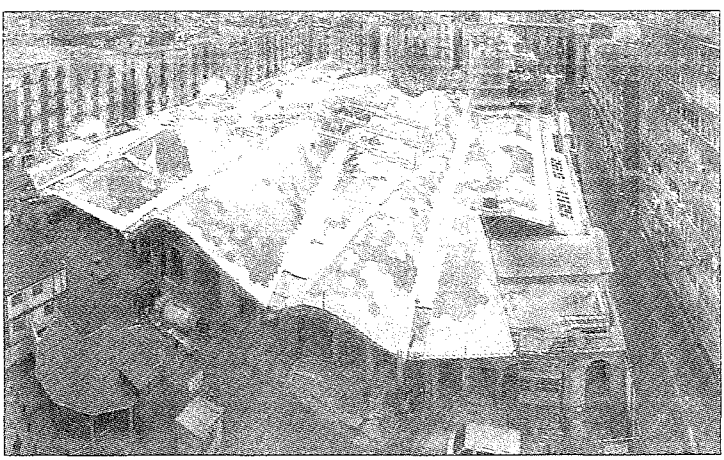


Figura 11.10. Reconstrucción del mercado de Santa Caterina a cargo de Enric Miralles y Benedetta Tagliabue. Los hexágonos pavimentan, por selección cultural, la compleja cubierta ondulada (fotografía de Benedetta Tagliabue).

Enric Miralles fue un arquitecto de talante y talento gaudinianos malogrado en el momento más creativo de su carrera. Quizá no se pueda aludir a él como un contraejemplo cuando se afirma que Gaudí no dejó escuela, pero Miralles tenía una penetración comparable cuando observaba la naturaleza y el mismo estilo científico a la hora de investigar y comprender las formas. La espléndida cubierta del mercado de Santa Caterina en Barcelona (figura 11.10), proyectada y ultimada con la colaboración de Benedetta Tagliabue, es un buen ejemplo de marginación de la línea recta y de la presencia de hexágonos multicolores que pavimentan una superficie ondulada que se diría en movimiento.

En suma, el hexágono pavimenta por selección fundamental, por selección natural y por selección cultural. La función de pavimentar parece una función (fundamental, natural o cultural) más única incluso que las funciones de la simetría circular de la que se deriva. No es una conclusión trivial. Se pueden encontrar y, sobre todo, se pueden inventar otros elementos pavimentadores de éxito no hexagonales, como baldosas cuadradas o rectangulares, o el genial y refrescante *trencadís* de Gaudí. En estos casos, el elemento pavimentador no procede de la superprobable simetría circular, no pertenece a la línea de mayor solera evolutiva. Todo eso, y no otra cosa, significa empezar a comprender un hexágono.

12
La espiral empaqueta...

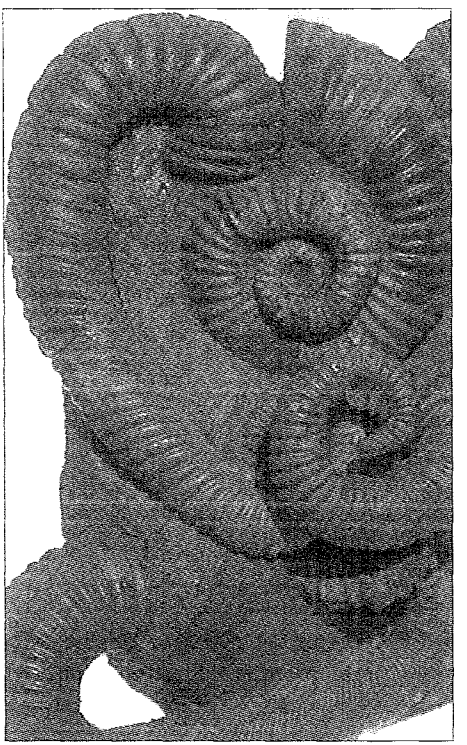


Figura 12.1. Amonites fósiles enrollados y desenrollados en una misma pieza (*Australopitecus jackii* y *Toxoceratoides sp.*, Queensland, Australia) del Cretácico inferior (120 millones de años, fotografía de Sergio Parra; colección MCFLC).

La simetría circular emerge con alta probabilidad y el hexágono debe buena parte de su emergencia a que deriva de la anterior. Consideremos ahora un punto que se mueve según una circunferencia, la versión lineal de la simetría circular, y que empieza a emigrar sin salirse del plano de la circunferencia. Se obtiene así otra forma matemática simple. Es la espiral.

¿Qué tal le va a la espiral en los mundos inerte, vivo y culto? La selección fundamental la favorece a escalas cósmicas y las selecciones natural y cultural a escalas más humanas. La sorpresa es que a la espiral no le va muy bien por selección fundamental en la nervura de lo real donde actúan las otras dos selecciones. El dato tiene su interés. Las selecciones natural y cultural distorsionan la abundancia de las espirales en la realidad, digamos, mesoscópica hasta hacer que éstas sean visibles con facilidad. En estos escenarios, la espiral aparece más por adaptabilidad y creatividad que por mera estabilidad.

En el mundo inerte emergen espirales en realidades muy diferentes por mecanismos muy distintos. Las más grandes, no hay duda, son las galaxias. Son conjuntos de cientos de miles de millones de estrellas interactuando a través de fuerzas gravitatorias. Son quizá los mayores conjuntos de materia con cierta identidad, con cierta independencia del resto del universo. Su tamaño oscila entre diámetros de 15.000 a 150.000 años luz. Los dos tercios de los cientos de miles de galaxias del universo son galaxias espirales (una distribución de estrellas con un centro masivo del que salen brazos espirales) y los dos tercios de éstas son galaxias espirales regulares. La galaxia a la que pertenecemos es una de ellas. El fenómeno más relevante de la constitución de la realidad galáctica es la fuerza gravitatoria. Para comprender la enorme forma espiral de los brazos de una galaxia hay que estudiar la estabilidad de un disco galáctico y atender a las dilatadísimas órbitas de las estrellas contenidas en este disco. Las estrellas más próximas al centro giran más deprisa que las que orbitan en la periferia y, sin embargo, los brazos espirales no se enrollan. La forma espiral de las galaxias es un complejo problema teórico que aún no se comprende bien. En los modelos intervienen ondas de densidad (como las de automóviles en una autopista cuando hay demasiado tráfico), la estabilidad del disco galáctico y las rotaciones de las estrellas. Pero ahí están los brazos espirales, inevitables para comprender la estabilidad de ese fluido en el que una

partícula es una estrella, el objeto más grande de la realidad de este mundo.

Pasemos ahora del disco galáctico al disco de una placa de Petri, como las que usan los químicos y los microbiólogos. Saltamos, pues, de un escenario de decenas de miles de años luz a un escenario de pocos centímetros. Aquí podemos presenciar la emergencia espontánea de espirales, por selección fundamental, en el mundo inerte de la química. Se trata de la célebre reacción de Belousov-Zhabotinsky. Los iones de Ce^{+3} y Ce^{+4} se pueden teñir con ferroína para visualizar cómo se distribuye su presencia (en colores azul y grana) en el espacio plano de un plato. Se trata, como el caso de la convección de Rayleigh-Bénard, de la emergencia de un orden por fluctuaciones en condiciones críticas de incertidumbre. [52] Así emergen espirales perfectamente disfrutables (bellísimas) por el ojo humano desnudo. En otra geometría del entorno, en un tubo de ensayo, por ejemplo, las regiones azul y grana más estables ya no son espirales, sino estratos horizontales o nubecitas pulsantes. Espirales de frágil estabilidad. Por ello, no es fácil que salgan en el álbum de fotos de la historia de la materia.

Otras espirales no vivas se pueden observar en raros crecimientos minerales o, con buena voluntad, según cómo se observen ciertos fenómenos hidrodinámicos, como remolinos, huracanes y tornados (en realidad son hélices que proyectamos mentalmente sobre un plano). Un fluido que se mueve en régimen laminar (líneas de corriente uniformes y paralelas) puede distorsionarse, también, en ciertas condiciones críticas, y mostrar la emergencia de bellas turbulencias espirales. Ocurre, por ejemplo, cuando un sólido intenta avanzar en el seno de un fluido más o menos viscoso... (detrás de un pez o detrás de la motocicleta que precede al ciclista que corre en esta especialidad).

La abundancia de espirales en el mundo vivo ya no se comprende por simple estabilidad. No nos hemos resistido a adelantarlo en su momento. La selección natural se tropieza con la espiral como un compromiso entre dos tendencias. Ambas generan independencia respecto del entorno, pero entran en conflicto mutuo. Una de ellas favorece el aumento de tamaño, la otra va en contra de la pérdida de movilidad. La espiral es la solución de compromiso, la solución para crecer ahorrando espacio (figura 12.2). En los invertebrados, la espiral se presenta en conchas y caparazones de decenas de miles de especies dife-

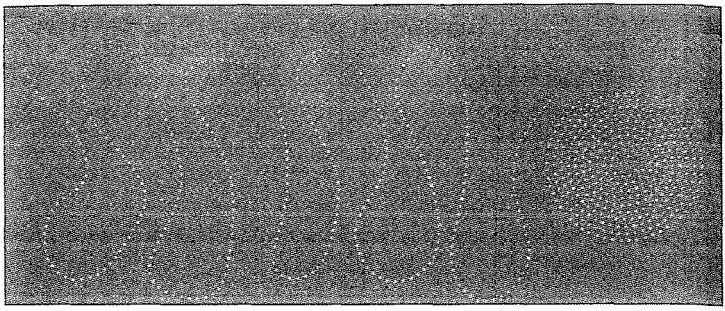


Figura 12.2. La espiral empaqueta (fotografía de Sergio Parra; colección MCFLC).

rentes. Dominan masivamente, es curioso, las dextrógiras, es decir, las que giran según las manecillas del reloj. Las especies levógiras son muy excepcionales. Y los individuos excepción (levógiros) pertenecientes a la especie mayoritaria son asimismo muy raros. Este dato sugiere que la selección ha actuado una sola vez con un éxito espectacular. En efecto, en ausencia de ulterior información, el razonamiento es sencillo. Si la selección natural hubiera intervenido en cada especie, entonces dextrógiras y levógiras estarían repartidas más o menos al 50 por ciento... Sin embargo, lo que observamos es un casi 100% frente a un casi 0%. La selección natural intervino una sola vez y, cuando lo hizo, la decisión, tomada al azar con un 50% de probabilidad, cayó de uno de los lados: el derecho. Por eso los caracoles y similares son de derechas. La estadística, que todo lo promedia, nos aporta aquí información sobre el lejanísimo instante en el que la naturaleza lanzó una moneda al aire. Lo importante es la espiral. Lo de menos, su sentido. La espiral empaqueta en cualquier sentido.

En 1992, el museo abrió una exposición sobre la evolución biológica. *Las palabras museográficas* eran, como siempre, objetos reales. En este caso, fósiles. Descubrimos la analogía como un buen método para hacer hablar a las piezas dentro de una vitrina. Por ejemplo, diferentes grados, desde la forma más o menos recta hasta la espiral, emergían en tres casos bien distintos entre sí (otra vez la inteligibilidad, pero ahora la inteligibilidad museológica, recordemos, lo común entre

lo diverso): la cornamenta retorciéndose sobre sí misma, desde el rebeco hasta la notoria espiral de un muflón; instrumentos musicales de viento, desde la fanfarria hasta la trompa pasando por el saxofón; y amonites, desde los cónicos ortoceras hasta claras espirales en nautiloideos de todas clases. Todos los casos estaban representados por tres piezas: una de baja o nula espiralización, otra con espiral incipiente o avanzada y finalmente la pieza con espiral consumada. De esta manera se sugiere un proceso que gana la espiral a golpe de selección natural y, con ello, la función de empaquetamiento. Sólo nos faltaba una pieza: la correspondiente al caso intermedio de los amonites. Teníamos un perfecto y enorme ortoceras procedente de Marruecos como representante del caso preespiral y un precioso ejemplar de amonites para ilustrar una espiral clara y completa. Así que, ni corto ni perezoso, le encargué a ciegas a mi proveedor habitual de fósiles un amonites con forma de saxofón. Recuerdo que se fue frunciendo el ceño. Estaba claro que nunca había visto nada igual y que no tenía ni idea de por dónde empezar a buscar. Naturalmente, en aquella época todavía no me había movido por los museos y ferias de fósiles, por lo que yo tampoco sabía si una pieza así existía o no. Se trataba de una predicción. ¡Una predicción en paleontología! En general los fósiles no se buscan sino que se encuentran. Por ello habría que hablar más de encontradores que de buscadores de fósiles. Seis meses después, mi encontrador de fósiles convertido en buscador, mi añorado amigo Andreu Solé, apareció radiante y satisfecho en mi despacho: «¡Ya lo tengo!, ¡y no ha sido nada fácil!». Algunos años después, en Tucson (Estados Unidos), en la mayor reunión de encontradores de fósiles del mundo, me tropecé con una pieza única. Era una pieza mil veces pensada, mil veces idealizada, como un amor adolescente, mil veces soñada, una pieza que contenía dos especies coexistentes, ¡una enrollada y otra a medio enrollar! ¿Se puede pedir más a una pieza de museo? (véase la figura 12.1 que abre este capítulo).

La función empaquetadora de la espiral se encuentra en innumerables individuos vivos. Se encuentra incluso en partes especiales de tales individuos. La situación general es ésta: a una parte de un individuo le interesa crecer para defender el todo al que pertenece, pero tal cosa perjudica la movilidad de ese todo. Es entonces cuando la solución natural bendice la espiral. Atención, se trata de espirales con soportes

Figura 12.3. Camaleón con su cola empaquetada en espiral.

bien distantes entre sí, pero todas con una función común (inteligibilidad): todas empaquetan. Los ejemplos más claros de tales apéndices corporales son: cuernos, colas, lenguas, trompas... Todas las espirales de conchas de todo tipo pueden proceder de un único episodio a nivel molecular, pero la espiral de una trompa de mariposa no es sospechosa de tener algún parentesco con la espiral de una trompa de elefante, ni la cola de un mono con la cola de un camaleón (figura 12.3), o la de un caballito de mar (figura 12.4). El dato hace que nuestra capacidad de comprensión se emocione.

La figura 12.5 muestra la trompa de una mariposa empaquetada (guardada) en espiral. Desplegada, su longitud puede alcanzar hasta veinte veces la longitud de su cuerpo. Sin el truco (solución) de la espiral, este insecto tendría en sus movimientos una enorme dependencia del paisaje inmediato por el que se mueve. Una cosa es desenrollar la trompa para libar y alcanzar de este modo los puntos más inaccesibles de una flor, y otra muy distinta volar con este apéndice desenrollado. No sólo se enredaría irremediablemente con todo, sino que con la trompa desplegada, el centro de masas se alejaría mucho del cuerpo

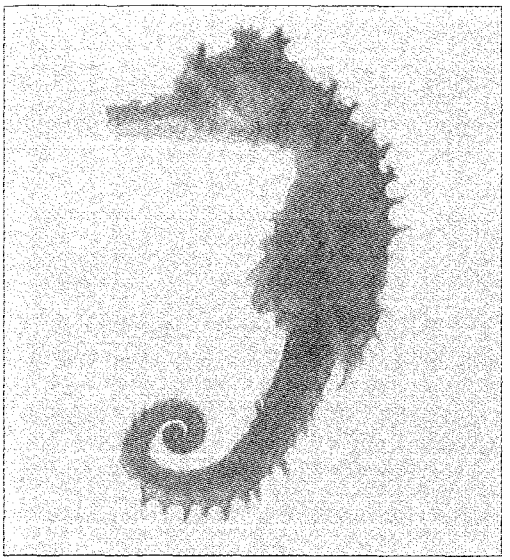


Figura 12.4. Caballito de mar. Su cola se agarra en hélice y se guarda en espiral, como casi todas las colas (colección MCFLC, fotografía del autor).

propiamente dicho, comprometiendo terriblemente la estabilidad del individuo. La situación equivale a una recién casada que sale de la iglesia a pasearse por el centro de la ciudad, vistiendo un traje de novia con una cola de ochenta metros: ¿cuántos metros podría caminar sin engancharse con algo?

La botánica también está preñada de espirales. Pero ¿cómo es eso? Ser grande aún importa, pero las plantas sólo se mueven en forma de semilla. Un caso muy curioso de espirilización lo encontramos en los helechos. Antes de desplegarse, la planta ya está casi completa en cuanto a masa y volumen. Todo está bien plegado en espirales primarias, secundarias... Aquí el empaquetamiento es una función en sí misma. Ahorro directo de espacio. ¿Cómo se explica sin la presión de la movilidad? El espacio es un valor en sí mismo. Es el escenario de la competencia por la captación de luz, de agua... La espiral dispone las cosas empaquetando bien de cara a la radiación. Son muchos y bellos los ejemplos que podemos encontrar en hojas, flores... Dé un paseo por el campo en busca de espirales. Es una excelente excusa.

Figura 12.5. Trompa de mariposa. Es muy útil para libar en puntos recónditos de las flores, pero es imposible volar con la trompa desplegada (colección MCFLC).

La espiral es una forma muy probable en la realidad culta. Un vistazo rápido a cualquier ferretería o cualquier hogar moderno mínimamente equipado nos convence de que la espiral continúa empaquetando por selección cultural. En efecto, en nuestra vida diaria nos hemos acostumbrado a usar objetos irremediablemente largos. Pensemos por ejemplo en el papel higiénico, el papel de cocina o el de embalar, en la cinta adhesiva, las clásicas casetes de audio o vídeo, en las antiguas películas, en los antiguos discos microsurcos, en los modernos discos compactos, en ingenios festivos como serpentinas y matasuegras... La eficacia de la capacidad empaquetadora doméstica de la espiral se demuestra con un ejercicio mental: desháganse mentalmente todas las espirales que tenemos en casa, está bien claro que no quedará en ella espacio para vivir. Espirales y más espirales.

La espiral reina plenamente en el mundo culto. Su presencia es universal. Pero el premio a la selección cultural de espirales no es sólo el empaquetamiento, por lo menos no directamente. Existe lo que en la primera parte hemos llamado una subfunción. Es la espiral como símbolo. ¿Qué cultura no incluye esta forma entre sus iconos? Empiezo con una anécdota personal inolvidable, tal vez absurdamente inolvidable.

Hace unos años me tocó acudir a un programa de radio para insomnes, de esos en los que se susurra, más que se habla, entre pedazos de música semianestésica. Sólo había tres personas más, un portero en la entrada, un técnico en el control de sonido, detrás de una gran cristalera, y un periodista junto a mí, en el minúsculo locutorio. La conversación, contagiada por la atmósfera y la hora, era lánguida y dispersa. Todos luchábamos contra el sueño (menos el portero, que dormía sin disimulo). El locutor hacía su pregunta y se quedaba con los ojos desenfocados hasta que algo le decía que estaba terminando mi respuesta; entonces se iba a la pregunta siguiente, que leía sin abandonar del todo sus ensoñaciones. El técnico cumplía su misión con movimientos automáticos, pero sin dejar de mover un bolígrafo sobre un pequeño pedazo de papel. Y yo iba respondiendo, pero mi atención se desviaba cada vez más hacia el técnico. Pero ¿qué escribe ese señor durante tanto rato, a estas horas, en una hojita tan minúscula? Lo supe al acabar el programa cuando, al salir, me las ingenié para mirarlo y matar mi curiosidad. Me despidió sin levantar el bolígrafo del papel.

No era un escrito, era un dibujo, una apretadísima espiral. La forma que más dura para pasar el rato.

Quiero contar otra historia parecida. El escenario es Marruecos. En un lugar desértico próximo a Aït Ouasik se conservan unos espléndidos grabados neolíticos en roca que tienen más de seis mil años de antigüedad. La preciosa pátina es inconfundible. Un aire cargado de finas partículas de arena ha ido lamiendo la piedra durante miles de años. Un grupo de grabados se encuentra sobre una elevación del terreno que domina lo que en aquella época debía de ser un gran río, un excelente mirador para controlar a los animales que acudían a saciar su sed. Supongo que los autores de aquellos dibujos debían de depender de ellos para casi todo: grasas, pieles, huesos para utensilios... Las figuras, aunque esquemáticas, son realistas y los animales representados se reconocen sin problemas: rinocerontes, gacelas, toros, zorros... Son realistas pero, *justamente por esquemáticos, equivalen ya a un primer* grado de abstracción, un primer paso para comprender. Sin embargo, en uno de ellos (y sólo en uno) descubrimos un segundo y quizás un tercer paso. Se trata de un grabado con dos dibujos (figura 12.6). El de la derecha no es fácil de reconocer en un principio, porque no representa un individuo vivo completo, sino sólo una parte de él, mejor dicho de ella: es la vulva de una hembra. Es un segundo nivel de abstracción, porque la vulva no aparece ligada a un cuerpo ni tampoco en el lugar que le corresponde (como se observa en otros grabados) sino desligada e independizada de su propietaria. ¡Es una vulva genérica! El dibujo de la izquierda es una hermosa y apretada espiral de paso constante. Estamos ante un nivel más de abstracción; no representa una parte de un individuo, ni una parte de una parte. Es un símbolo. ¿Asociado deliberadamente a la vulva? ¿Es una especie de traducción?

Lo que sigue es una especulación, pero creo que una especulación verosímil. Los autores de estos dos niveles de abstracción vivían de la caza y, probablemente por ello, seguían a las manadas de animales, *animales necesarios para su subsistencia. Quizá los pintaban de tanto* vigilarlos, de tanto seguirlos, de tanto desearlos. Quizás el hecho de dibujarlos tuviera un significado mágico a favor de asegurar su existencia, su abundancia, su salud... Así que, uno: dibujar es siempre un ejercicio de abstracción y un ejercicio de inteligibilidad. Conocimiento. No se puede dibujar sin separar, con algún criterio, la esencia de los matices,

Figura 12.6. Espiral del Neolítico originaria del norte de África junto a una vulva. La espiral es, por selección cultural, un símbolo solar, de continuidad, eternidad o fecundidad en casi todas las culturas (copia colección MCFLC, fotografía del autor).

lo trascendente de lo superfluo. Además, dos: separar una parte de un todo equivale a subrayar esa parte dentro de ese todo. En otras palabras, aquellos humanos no sólo miraban, vigilaban y deseaban a los animales. Intentaban conocerlos. Conocerlos para anticipar su incertidumbre, es decir, miraban, vigilaban y deseaban la continuidad de los mismos. Quizá sea ése el significado del segundo nivel de abstracción confiado a los genitales femeninos: continuidad a través de la reproducción. Que no falte. Pero esta historia culmina con un extraordinario tercer grado

de abstracción. Ahora el dibujo no representa un individuo vivo, ni parte de él, sino una forma matemática, un símbolo puro, una espiral, la mejor forma para representar la continuidad, la que tarda más en agotar el tiempo o el espacio... En el museo, donde tenemos una copia científica en resina, la pieza se ha ganado el apodo de «piedra roseta de la sexualidad». La espiral empaqueta la continuidad. La inteligibilidad es lo común entre dos episodios aparentemente distintos: el técnico de sonido dibujando una espiral en un pedazo de papel y el cazador neolítico esculpiéndola en una dura roca. Queda poco más que decir. La espiral es un signo omnipresente en la historia de casi todas las culturas humanas y casi siempre con el mismo significado: símbolo solar, eternidad, fecundidad, feminidad...

Bien, quizá queda algo por decir. La espiral como recurso arquitectónico. La escalera es un artefacto que sirve para transitar entre dos cotas diferentes, entre dos alturas diferentes en la dirección del campo gravitatorio. Normalmente se considera que la pendiente de una escalera no debe superar el diez por ciento (por encima de este valor, una silla de ruedas o una persona no muy fuerte puede encontrar serios problemas), por lo que subir a una torre de más de cien metros de altura de una catedral, por ejemplo, requeriría salirse del orden de un kilómetro del recinto del templo. Hay que empaquetar. Y eso es lo que consigue la celebérrima escalera de caracol. El caso de Gaudí y la forma de las escaleras que acceden a la cima de las torres de la Sagrada Familia no tiene desperdicio (véase, más adelante, la figura 19.11). Su proyección sobre un plano coincide inquietantemente con la forma de los bellos y raros nautilóideos. En rigor, la escalera de caracol es una hélice y de ella nos ocupamos a continuación.

En suma, la espiral empaqueta, guarda, simboliza continuidad y, según cómo, también agarra un poco... Todo eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la espiral.

13
La hélice agarra...

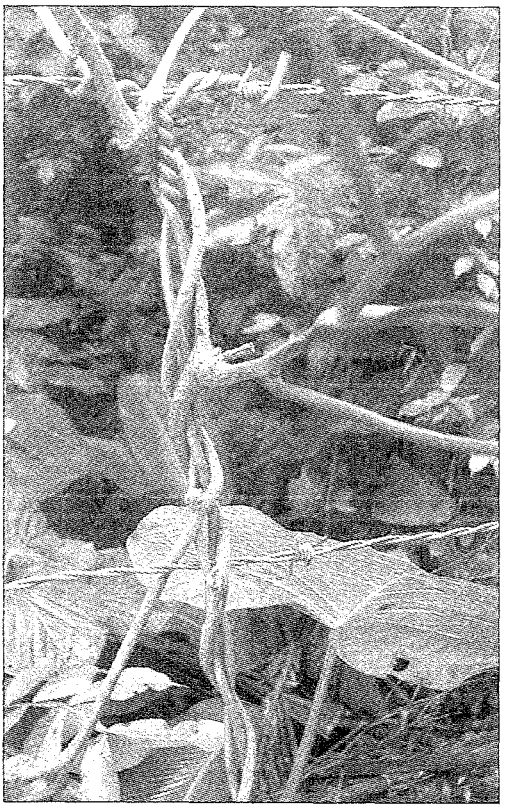


Figura 13.1. Una hélice por selección natural agarrándose a una hélice por selección cultural en una finca de Camburí (São Paulo, Brasil, fotografía del autor).

La simetría circular emerge con alta probabilidad, y la hélice debe también su emergencia a que deriva de la anterior. Un punto que describe un movimiento circular en un plano y que emigra en la dirección perpendicular al mismo se mueve según esta inquietante forma geométrica. En el mundo inerte la situación no es rara, es la traslación de un movimiento circular. Es el caso de remolinos, tornados, trombas marinas, huracanes y vórtices de diferente especie; es también el caso de tantas turbulencias locales cuando un sólido se mueve dentro de un fluido (la movilidad de cualquier ente vivo). La selección fundamental puede admitir muchas hélices ligadas al concepto de planeta. Los planetas, que giran en torno a sí mismos y se trasladan respecto de su estrella, son sin duda un buen escenario para la emergencia de una hélice. Es una hélice como forma de una trayectoria, es decir, es el rastro de un móvil. En el caso de un huracán, el fenómeno se traduce en la forma de un gigantesco objeto. La hélice es aquí la forma matemática de un objeto compatible con unas condiciones de movimiento (rotación y traslación), pero íntimamente relacionado con otro concepto físico: la fricción. La duración o persistencia de muchas hélices compuestas de materiales fluidos *helicoideando* en el seno de otro fluido (como huracanes, remolinos y tornados) se debe a la conservación del momento angular, mal que le pese a la pérdida de energía vía fricción. Por la misma razón, una bicicleta es tanto más estable cuanto mayor sea su velocidad, aunque cada cambio de velocidad requiera una ganancia o pérdida de energía. Las fuerzas más importantes en este caso son las fuerzas de fricción. La fricción entre la rueda de la bicicleta y la superficie del terreno reduce la velocidad hasta un punto en el que se pone en peligro la estabilidad. El ciclista debe suministrar entonces la energía suficiente para alejar el riesgo. Un huracán tropical alcanza velocidades de locura y se tranquiliza hasta convertirse en una tormenta tropical debido también a la fricción. La fricción depende de la superficie (o longitud) a lo largo de la cual se produce el contacto entre dos materiales. La espiral, al empaquetar, ofrece grandes longitudes o superficies de contacto, pero, en general, de un material consigo mismo. La hélice, sin embargo, ofrece una buena manera de empaquetar un material en torno a otro material. Son las condiciones óptimas para que las fuerzas de fricción o de viscosidad hagan que un material se agarre al otro.

Sí, lo reconocemos, la hélice *agarra*. También empaqueta, porque se despliega sin alejarse de una recta (el eje de la hélice), pero sobre todo agarra. (De forma simétrica, la espiral también agarra, pero sobre todo empaqueta.) Es el caso de una cuerda enrollada en torno a un cilindro de, digamos, madera (figura 13.2). La fuerza de agarre entre la cuerda y su soporte de madera depende de dos cosas: la naturaleza de los materiales (el contacto de la madera rugosa con la fibra vegetal agarra más que el de la madera pulida con un sedal de nailon) y de la longitud a lo largo de la cual se establece el contacto de tales materia-

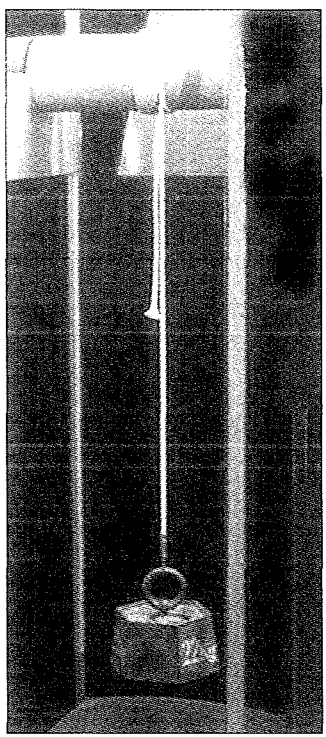


Figura 13.2. La ley de Euler en física: la fuerza de fricción de una cuerda enrollada en torno a un cilindro crece exponencialmente con el número de espiras de la hélice. La hélice agarra (fotografía del autor).

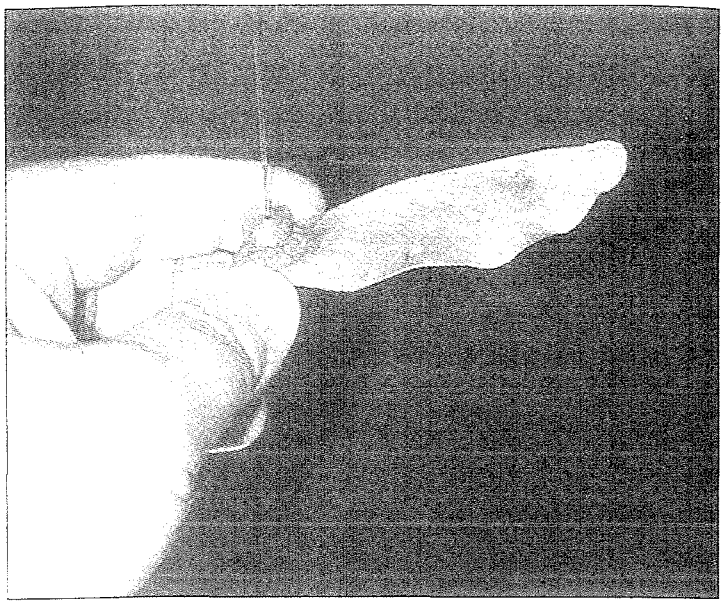


Figura 13.3. Semilla que, al caer, lo hace en hélice para agarrarse al aire y aumentar así su probabilidad de explorar nuevos territorios (fotografía del autor).

les. En física hay nombre para esto. Es la llamada ley de Euler. A diámetro del eje central constante, la longitud es directamente proporcional al número de espiras (número de vueltas de la cuerda en torno al palo central). Pues bien, la fuerza que hay que hacer desde un extremo para aguantar un peso que cuelga del otro decrece exponencialmente con el número de vueltas. Por ejemplo, se puede sostener un peso de veinticinco kilos con sólo tres o cuatro vueltas de cuerda en torno a un eje horizontal de madera de unos diez centímetros de diámetro. El efecto se acentúa espectacularmente, claro, al aumentar el diámetro del cilindro de madera.

Existen semillas (figura 13.3) que caen en hélice (13.4). Es decir, caen mientras giran sobre sí mismas, de modo que la trayectoria de un punto cualquiera de la semilla es una bellísima curva helicoidal. Está claro que la diferencia entre caer a plomo según la vertical y caer en

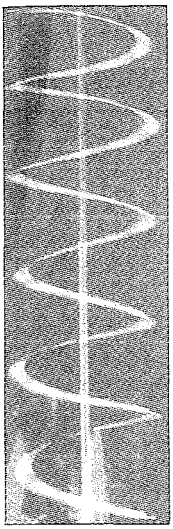


Figura 13.4. Trayectoria en hélice de una semilla (fotografía del autor).

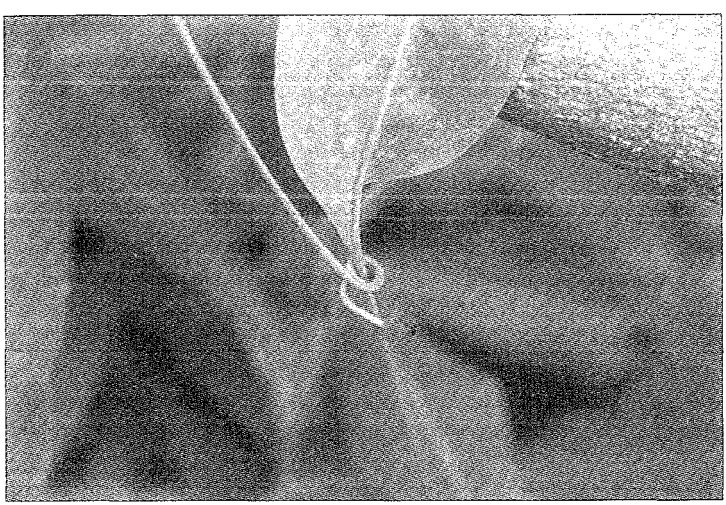


Figura 13.5. Zarcillo. Una selva tropical se sostiene con hélices (fotografía del autor).

hélice en torno a ésta radica en la duración de la caída. La segunda caída es más larga, la semilla tarda más en caer, se mantiene más tiempo en el aire. La semilla, al caer en hélice, se agarra al aire. ¿Qué puede ganar con ello la planta? Pues quizás aumentar la probabilidad de desplazarse a un nuevo territorio. Conquistar o explorar el espacio es justamente la *misión* de toda buena semilla. La selección natural favorece las formas de semilla que obligan a una caída en hélice. Las plantas que usan esta idea se propagan más y dejan más descendientes. Sutil ejemplo de hélice cumpliendo con su función de agarrar. En el lenguaje de nuestro esquema conceptual, la movilidad de las plantas es una subfunción del agarre que consigue una forma matemática llamada hélice.

Pero las plantas usan también la hélice para agarrarse físicamente entre sí. He aquí una sugerencia para sorprender a familiares y amigos durante una excursión campestre. En un paseo por cualquier camino que atraviese un área más o menos silvestre, se tarda poco en dar con el siguiente objeto: una mata en la que aparecen hojas de, como mínimo, dos formas distintas. Las hojas de una misma planta tienen todas la misma forma, por lo que en este caso se concluye enseguida que la mata está compuesta de dos plantas distintas bien agarradas la una a la otra (o la otra a la una). Delante de esta pequeña maravilla, uno puede ponerse de espaldas a la mata y, de cara a la audiencia acompañante, tomar con la mano una de las hojas y, sin mirar atrás, tirar con suavidad de ella mientras anuncia solemnemente: «Atención, atención, ¡la hélice!» (figura 13.5). Unos *ohs* y *ahs* de admiración serán el anuncio de que nuestra predicción a ciegas ha tenido éxito, que una hélice ha emergido a nuestras espaldas. En efecto, las plantas se agarran las unas a las otras y para ello la selección natural ha favorecido la hélice. La función de agarrar consagra una profusión de hélices en el mundo de las plantas, zarcillos, lianas... Basta sentarse un momento y mirar con buenos ojos, es decir, con *ojos helicoidales,* una selva tropical... todo se agarra en hélice. Hay algo de lo que no nos damos mucha cuenta al observar la espesura de una selva: la agresividad y la violencia que se esconden bajo la imagen aparentemente plácida de las hojas y ramas mecidas por la brisa. Si tuviéramos algo equivalente a la tecla de avance rápido de los reproductores de vídeo, algo que nos permita acelerar el curso natural de las cosas, nos quedaríamos atónitos ante el es-

pectáculo. La lucha por la luz convierte lo que a nuestro ritmo se nos antoja inmóvil en una sucia carrera, llena de trucos, por llegar a la primera fila de sol. No hay reglas. Todo vale. Encaramarse encima del vecino, estrangularlo, desplazarlo... Y en toda esta lucha sin cuartel la protagonista inevitable es la hélice. La hélice agarra. Si con una varita mágica hiciéramos desaparecer todas las hélices de la selva, el espectáculo tampoco tendría desperdicio. Sencillamente, la selva se vendría abajo con un enorme estrépito. Todo está, estaba, agarrado por hélices. En la naturaleza, la función de agarrar está confiada a una forma, la hélice.

En el mundo animal se dan buenas convergencias en torno a la hélice. Hemos comentado que casi todas las colas y trompas se guardan en espiral. Es decir, son espirales cuando no se usan pero ¿qué forma adoptan cuando se usan? Bien, depende de para qué se usen. Si una trompa se usa para ingresar o expulsar algún fluido, como la mariposa cuando liba, el mosquito cuando chupa sangre o el elefante cuando succiona agua, entonces la forma tiende a ser recta, la que menos resistencia ofrece al paso del material. Pero hay otro uso mucho más habitual de las colas y trompas. Es lo que hacen los elefantes con la trompa cuando tienen que mover un tronco o lo que hacen tantos monos con su cola (cuando necesitan sus cuatro extremidades para otra cosa): agarrar (figura 13.6). O sea, la mayor parte de las colas y trompas que se guardan en espiral se utilizan en hélice. El simpático hipocampo, el caballito de mar, nada con la cola en espiral, como la mariposa cuando vuela, o el elefante cuando camina, pero se agarra con la cola en hélice cuando lo que le interesa es que no se lo lleve la corriente. La hélice agarra también en el sentido de proporcionar resistencia a la tracción (figura 13.7). Un tendón, por ejemplo, no equivale sólo a una cinta elástica. Tiene toda una estructura jerárquica: tiene haces de fibrillas, las cuales se componen de subfibrillas hechas de microfibrillas que son en último término manojos de cadenas de aminoácidos enrolladas según hélices triples. [53] Como veremos en lo que sigue, muchos objetos de nuestra vida cotidiana se basan en esta misma idea.

Por su parte, la hélice culta sirve sobre todo para agarrar. La selección cultural converge en función con la selección natural. Bastan dos palabras para liquidar la cuestión: cuerdas y tornillos. Es la evidencia apabullante de nuestra vida cotidiana. Fabricamos tejidos trenzando hilos y los hilos son fibras (animales, vegetales o sintéticas) retorcidas en

torno de sí mismas. El tejido debe su consistencia al concepto «hélice». Las cuerdas y los cables son hélices de hélices. Una soga para sujetar un barco puede estar fabricada con una hélice de una hélice de una hélice de una hélice de una hélice de una hélice de una hélice de una hélice de una hélice (figura 13.8), y así hasta más de veinte veces. En las múltiples y largas longitudes de fricción a diferentes niveles descansa la resistencia de este invento a las fuerzas de tracción.

La hélice agarra y el tornillo es un auténtico himno a esta afirmación (figura 13.9). La diversidad de tornillos en cuanto a materiales, ta-

Figura 13.6. Mono barrigudo del Amazonas sujetándose con una hélice de su cola de poco más de una vuelta. Las colas se guardan en espiral, pero se usan en hélice (fotografía del autor).

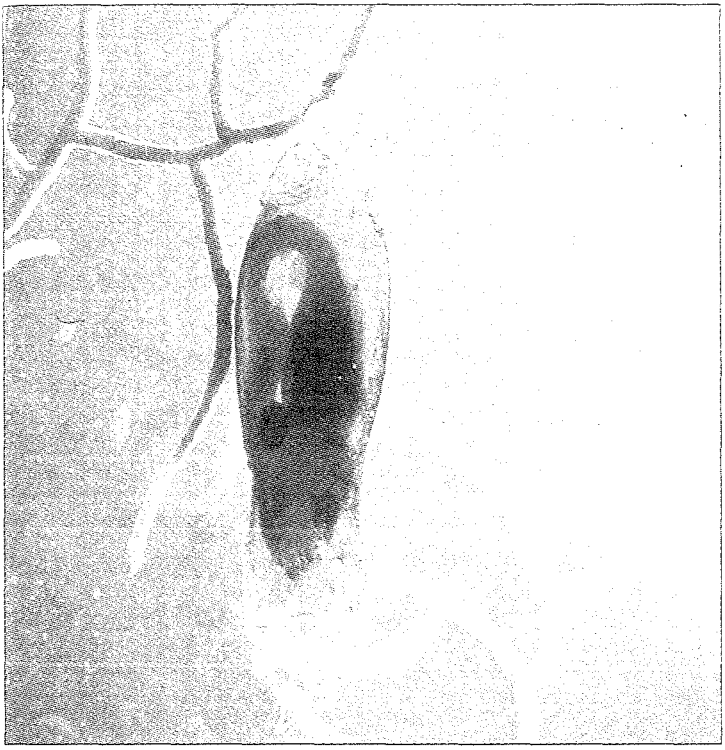


Figura 13.7. Huevo de tiburón sujetándose con vueltas de hélice (fotografía del autor).

maños y formas es espectacular, tanto como la diversidad de las cuerdas. Pero la función es una: agarrar. Podemos repetir aquí un experimento mental similar al propuesto en el caso de la selva. Si con una varita mágica enunciáramos el deseo de que desapareciesen todas las hélices de Barcelona, entonces la ciudad se vendría abajo en un instante. Sin sus hélices, cualquier ciudad se hundiría en segundos hasta quedar en un plano.

La figura 13.1, con la que hemos abierto este capítulo, muestra un caso muy visible en las vallas de las fincas en el litoral brasileño. Es

una hélice natural enroscándose en una hélice cultural. Se diría que se plagian mutuamente en la función de agarrar.

La capacidad de agarre de las hélices naturales tampoco escapó a la penetrante intuición científica del arquitecto Gaudí durante sus paseos. Gaudí debió de observar la estructura helicoidal que el tronco de un árbol suele esconder bajo su corteza (y a veces en ella misma). Un árbol es un cilindro. Se trata de una figura de simetría circular. Un cilindro es quizá lo más esférico que se puede ser cuando la gravedad y la luz del sol rompen la isotropía del entorno... Pero un cilindro dispuesto verticalmente en un campo gravitatorio tiene un problema, un problema con nombre: el pandeo. En efecto, en la práctica no se pueden eliminar del todo los componentes horizontales de las fuerzas. De modo que, por pequeños que éstos sean, poco a poco y a la larga, el objeto cilíndrico acaba echando barriga. Se pandea. Hay como mínimo dos soluciones a este inconveniente. Son dos soluciones basadas en la propiedad llamada «forma». Una es el cono. En mayor o menor medida, casi todos los troncos de árboles son cónicos. El diámetro de la base es mayor que el de la punta. La otra solución es la hélice. Los troncos de muchos árboles se retuercen sobre sí mismos.

Gaudí construyó columnas helicoidales, como las famosas del Parque Güell de Barcelona (véase, más adelante, la figura 19.12). Pero Gaudí nos depara aún otra sorpresa helicoidal. Una sorpresa grande. Me lo hizo notar mi amigo Hernán Crespo, dos segundos después de descubrirlo él mismo, un día que me acompañó para fotografiar la fachada del edificio de La Pedrera en Barcelona. Ahí estábamos, parados delante de la fachada, rodeados de turistas, y observándola a través de la cámara con el propósito de añadir una especie de *postcriptum* gaudiniano a nuestra exposición sobre las formas. La forja de hierro del balcón central del piso principal exhibe una forma bien clara para el observador atento: es una doble hélice (¡?) (véase, más adelante, la figura 19.13). No aparece en ningún otro lugar de la arquitectura de Gaudí. Se acaba de celebrar el cincuenta aniversario del descubrimiento de la estructura del ADN por parte de Watson y Crick, probablemente el descubrimiento científico más importante del siglo XX. Una doble hélice ya era una forma sorprendente en aquella época. Un buen observador se da cuenta de que los árboles se retuercen sobre sí mismos. Pero no hay dobles hélices en la naturaleza que sean visibles a simple vista. Así que, ¿de dónde saca Gaudí la idea de

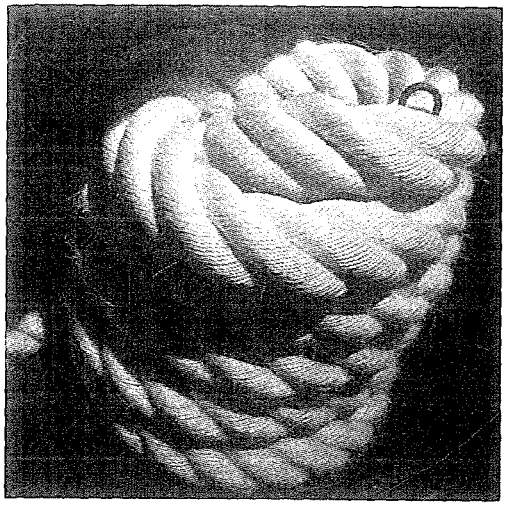


Figura 13.8. Una soga es una hélice de una hélice de una hélice de una hélice... Lo mismo ocurre con las fibras de las ropas que vestimos (fotografía del autor).

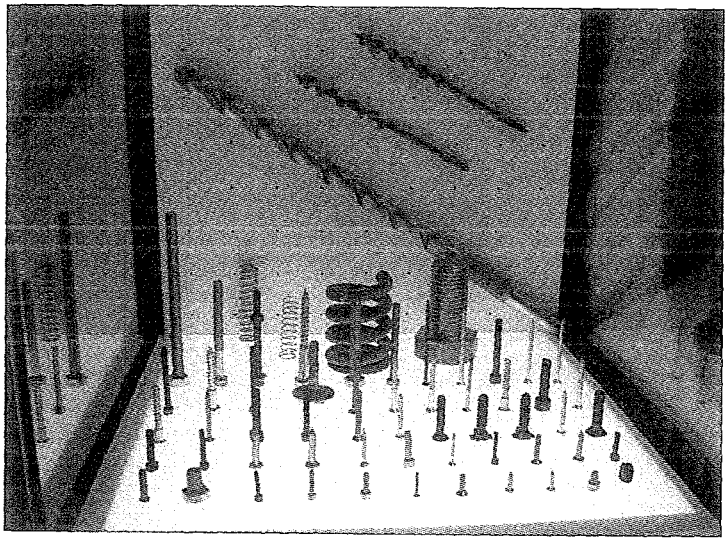


Figura 13.9. Tornillos del taller de mantenimiento del Museu de la Ciència de Barcelona. Todo lo que nos rodea se sostiene con tornillos (fotografía del autor).

una única doble hélice para el balcón de la vivienda más importante del edificio de viviendas más importante que jamás diseñara? Sólo podemos especular. Creo que Gaudí tenía una intuición científica muy especial. Hablaremos de ella en el epílogo. Gaudí debió de intuir que la hélice agarra muy bien y que no empaqueta mal. Empaquetar y agarrar (guardar y blindar). ¿No es eso lo que cualquiera haría con un tesoro? ¿Y por qué doble? Si se trata de un tesoro que se hereda, que se transmite, entonces mejor que incluya el concepto de «copia»...

En suma, la hélice agarra. También empaqueta, por lo que una hélice enrollada sobre sí misma es una magnífica idea para guardar algo con cierta seguridad... Todo eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la hélice.

14
El ángulo penetra...

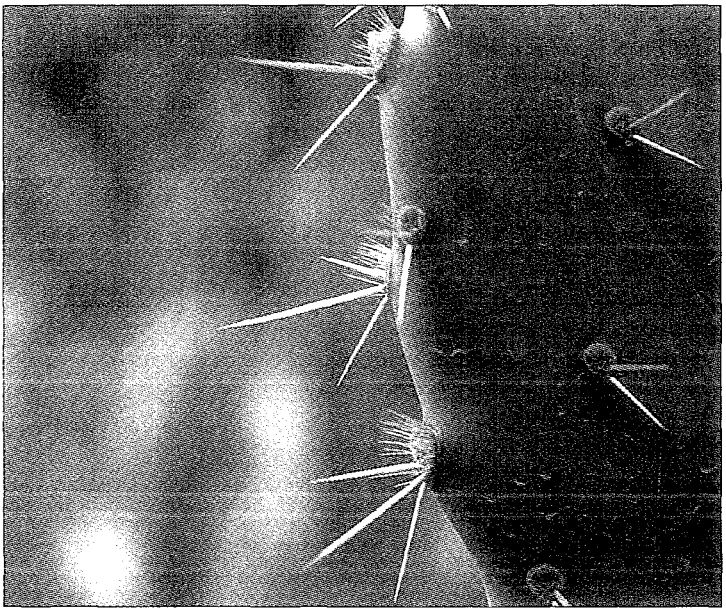


Figura 14.1. Las espinas del cacto son hojas que la selección natural ha empujado hacia la forma de punta (fotografía del autor).

El cono es un gran generador de formas matemáticas. Cortando una superficie cónica por una superficie plana, por ejemplo, se puede obtener la circunferencia (cuando el plano es paralelo a la base del cono), la elipse (cuando el plano incide según una dirección que está entre el plano paralelo a la base y la dirección de la generatriz del cono), la parábola (cuando el plano incide según una dirección que está entre la generatriz del cono y la dirección perpendicular a su base), la hipérbola (cuando el plano incide según la perpendicular a la base del cono)... Por algo las formas de esta familia se llaman *cónicas*. Por ello, en una copa de cava cónica, la superficie del líquido forma una circunferencia si la copa está perfectamente vertical y una elipse en cualquier otro caso. Por ello, cuando afilamos un lápiz de sección hexagonal u octogonal con un sacapuntas cónico, las separaciones entre el cono de la punta del lápiz y cada uno de los planos laterales son pequeños fragmentos de hipérbola. Por ello, es muy frecuente que los focos de luz proyecten parábolas en la pared cuando se disponen para crear la llamada «luz indirecta». Son formas que, como se ve, se pueden obtener fácilmente del cono. En el epílogo primero de este ensayo, a la hora de la síntesis, nos hemos referido a esta noble y aristocrática familia de curvas, las cónicas. De momento, centremos nuestra atención en un lugar bien singular del cono. Es un punto bien destacado: la punta.

La punta de un cono, la punta de un triángulo, la punta de un ángulo, la punta de cualquier cosa es un punto donde convergen líneas, superficies y volúmenes. Por lo tanto, cualquier cosa (materiales, cargas, fuerzas...) que se distribuya sobre líneas, superficies o volúmenes se concentra a medida que se acerca a la punta. Ya está dicho, *la punta concentra*, sobre todo concentra. Puede concentrar materiales, en cuyo caso podríamos denominarlo «efecto embudo» (figura 14.2), puede concentrar fuerzas, en cuyo caso merecería el apelativo de «efecto aguja» o «efecto filo», puede concentrar cargas eléctricas, que es el «efecto punta» de los pararrayos (las cargas en un conductor no se distribuyen uniformemente, sino que se concentran en las puntas o en las regiones afiladas).

En el mundo inerte, la punta o el filo puede darse de varias maneras. Una muy verosímil es la simple fractura de un objeto sólido y duro. Ha habido tantas ocasiones en la historia del planeta para que ello ocurra que cuesta poco imaginarse cómo hizo el *Homo habilis* para descubrir

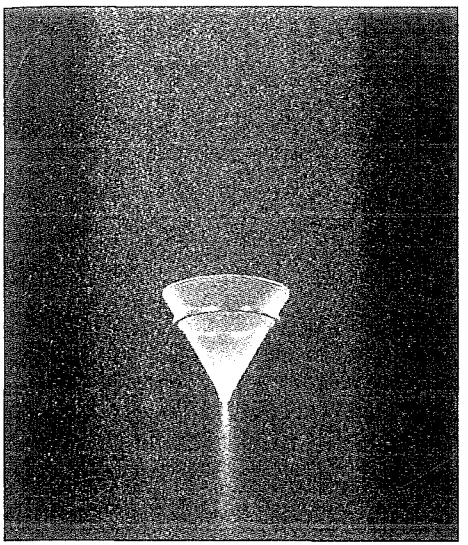


Figura 14.2. Lluvia de arena concentrada por un embudo. El ángulo concentra (colección MCFLC, fotografía de Sergio Parra).

la industria lítica. Con ello se inicia una larga historia que llega hasta nuestros días y que bien podría titularse *En busca del filo*. Pero antes de tratar la selección cultural de la punta y el filo, digamos que ambos pueden crearse también, espontánea y lentamente, como consecuencia de un proceso de crecimiento o cristalización. Mientras la erosión no lo castigue, el perfil agudo de una roca o la punta de un cristal de cuarzo penetra todo aquello que, siendo menos duro, presione sobre esta forma. Así se confeccionan, por ejemplo, las escalas de dureza.

El ángulo, el cono, la punta (en su versión cóncava o convexa) concentran. Pero si lo que se concentran son fuerzas, entonces podemos anunciar que el *ángulo penetra*. Así se comprende la presencia masiva de puntas en el mundo vivo. Afilar significa buscar la máxima concentración de fuerzas. Eso tiene un nombre en física: presión. La presión no es otra cosa que la fuerza por unidad de superficie o, si se quiere, la fuerza resultante que se ejerce sobre una superficie dividida por el valor de dicha superficie. Con fuerza constante, se puede aumentar la presión por el viejo truco de disminuir la superficie de aplicación de la fuerza. A menos superficie, más presión. Tres pesos iguales

sobre tres puntas de distinta superficie (más romas o más agudas) muestran claramente que a más agudeza, más penetración. Cuanto menor sea la superficie de contacto, mayor será la concentración de la fuerza (mayor será la presión, es decir, la fuerza por unidad de superficie) y, por lo tanto, mayor será también la penetración. Por eso pincha una aguja: el menor esfuerzo hace que ésta atraviese la piel.

La selección natural bendice esta idea con entusiasmo. ¿Se puede pensar en algo más idóneo a la hora de comer y no ser comido? La punta se prodiga por doquier en el mundo vivo. Lo importante es pinchar para atacar, pinchar para defenderse. Lo que no importa tanto es la particular manera de hacerse con una punta. Lo común, lo que converge, es la punta, punta para penetrar.

El mundo vegetal y animal exhibe puntas de las más impensables procedencias. Las plantas usan las puntas para (sobre todo) defenderse de (sobre todo) los animales. Los animales usan las puntas para atacar y para defenderse, y para un rico sinfín de subfunciones de la penetración (comer, excavar, agarrarse...). Ante una amenaza, las plantas no pueden optar, claro está, por la huida. Una manera, aunque no la única, de desanimar a los animales que se interesan por sus tallos tiernos, hojas o frutos consiste en una defensa pasiva *pre*parada a base de puntas. Son las púas y espinas de tantos arbustos y árboles. Las puntas penetran gracias a la forma y por la fuerza de reacción que hace el infortunado animal cuando presiona voluntaria o involuntariamente la planta en busca de su sustento. El material de que está hecha la punta es variadísimo. Ciertos árboles fabrican púas durísimas deformando la corteza del tronco (figura 14.3). Las temibles púas de los cactos, en cambio, proceden de las hojas (véase la figura inicial de este capítulo, 14.1). Mejor dicho, son hojas deformadas. El concepto «corteza» y el concepto «hoja» suelen exhibir formas muy características y generales que están muy lejos de la forma penetrante. La selección natural las favorece y consagra porque pinchan.

En el reino animal, la punta se consolida con la función de pinchar (figura 14.4) y con una enorme variedad de subfunciones derivadas: dientes para cortar, como los incisivos; dientes para pinchar y desgarrar, como los colmillos; uñas para arañar o para clavarse, garras para agarrar la presa, garras para agarrarse al terreno, como los clavos de la zapatilla de un velocista olímpico, garras para abrir y desgarrar las car-

Figura 14.3. Las púas de este árbol son el resultado de una deformación de la corteza (fotografía del autor).

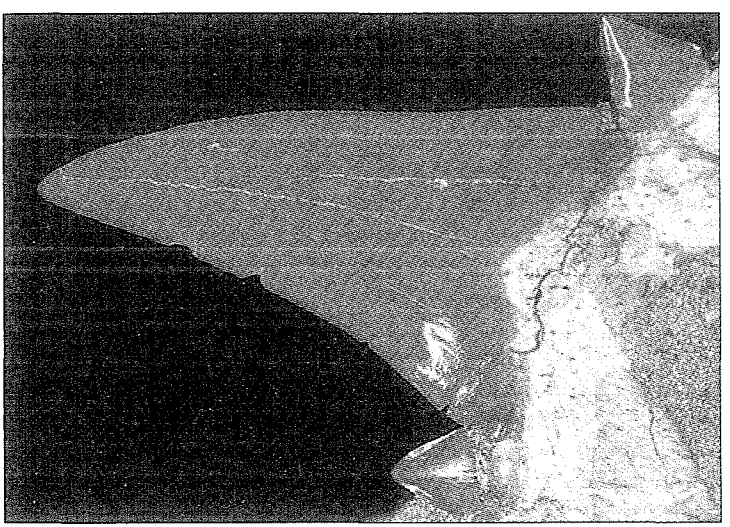


Figura 14.4. Dientes de tiburón. El ángulo también concentra fuerzas, en tal caso, el ángulo penetra. La selección natural favorece la punta para comer y no ser comido (fotografía del autor).

nes, cuernos para defensa, cuernos para presumir, porque está claro que podrían llegar a pinchar, espadas y lanzas para intimidar porque pinchan o parecen capaces de hacerlo, púas para pinchar, como las del erizo o el puerco espín, penes para penetrar... Cortar, pinchar, agarrar y desgarrar son subfunciones de la función de penetrar que ayudan tanto a la hora de comer como de no ser comido. En el reino animal y vegetal, las puntas proceden a menudo de otras utilidades, es decir, son el resultado de reselecciones naturales. La evolución lo aprovecha todo y, en muchas ocasiones, sus logros parecen auténticas chapuzas. Los cuernos, por ejemplo, pueden ser el resultado de una transformación de la piel, del pelo, o incluso de un diente. El formidable cuerno del narval es un buen ejemplo de dos de las formas tratadas aquí, la hélice (resistencia) y la punta (penetrabilidad), aunque nadie sabe a ciencia cierta cuál es la función principal de tan espectacular apéndice (seguramente presumir). Las garras sirven para evitar resbalar al correr (como los clavos de las zapatillas de los velocistas olímpicos), para agarrar, para herir... Los dientes pueden tener, como se sabe, diferentes funciones: pinchar, cortar, desgarrar, masticar, moler... Algunas especies de los mamíferos xenartros (perezosos, osos hormigueros y armadillos) tienen los dientes sin esmalte y en constante crecimiento. La solución es brillante, pues los dientes adquieren la forma que más conviene según el uso que se les da. Si se corta con ellos se deforman, de modo que cada vez cortan mejor. Y lo mismo cabe decir de las piezas dentales que por moler muelen cada vez mejor, o que por pinchar pinchan cada día más. Curioso sistema del que se podría decir por fin que la *función hace al órgano*. Por una vez se puede hacer la broma: la selección darwiniana favorece un mecanismo lamarckiano.

El gliptodonte, un armadillo gigante de la megafauna argentina extinguido en el Pleistoceno, es un caso que exhibe varias de las formas favoritas de la naturaleza: hexágonos en su caparazón, como tantas tortugas, quizás una catenaria en su perfil (la comentaremos más adelante), y las puntas de su temible cola, rematada con una especie de porra con puntas al estilo de las de los gladiadores romanos y ciertos guerreros medievales. ¿Qué animal no usa la punta para penetrar? La usan desde los microscópicos copépodos hasta los gigantescos *Triceratops*.

Llegamos así a la selección cultural. Antes hemos citado al *Homo habilis* como el primer ser vivo que selecciona (culturalmente) la punta

para penetrar. Quizá no sea del todo justo. El gran naturalista y etólogo Jordi Sabater Pi [54] nos hizo saber en 1974 que los chimpancés tienen cultura. La prueba era nada menos que la selección cultural de ramas que estos animales introducen en los termiteros y hormigueros para capturar insectos. Los chimpancés incluso preparan y reparan sus herramientas para que puedan cumplir bien su función de penetrar. La industria lítica humana consigue que una piedra prolongue los resultados de un brazo rematado con la buena idea de una mano. Los homínidos dieron un gran salto con esta contribución del *Homo habilis*. ¿Un salto de qué? Podemos declararlo sin complejos (con la definición que hemos adelantado): un salto de progreso. No es difícil dramatizar el gran descubrimiento. Un homínido de hace dos millones de años se corta (accidentalmente) con un canto (también accidentalmente) afilado de una piedra. Mientras la sangre le mana a borbotones, el homínido *comprende* la relevancia de lo que está viendo. Lo que está viendo tiene en común muchas cosas con otras muchas de sus necesidades cotidianas. Esta reflexión le permite comprender y, por lo tanto, anticipar. Pinchar, cortar. Las cosas ya no serían nunca como antes. Con la punta y el filo, ¡dos formas de la superficie de los objetos!, el homínido progresa porque gana independencia de la incertidumbre del entorno. La probabilidad de cazar para su sustento aumenta. Las operaciones que puede hacer con la pieza cazada son más y de mejor calidad: despellejar, cortar la carne, romper los huesos... La capacidad de defensa también aumenta. La consagración de la punta y el filo arrancan ahí, alcanzan una perfección notable en el Paleolítico medio (figura 14.5) y no deja nunca de evolucionar, como se puede comprobar en una caja de herramientas actual o en el instrumental quirúrgico moderno.

La historia de la humanidad respecto del dominio de la materia se divide de hecho en tres grandes edades. Desde el lejano *Homo habilis* hasta la Edad del Bronce prácticamente sólo se *formaba* la materia, es decir, se daba forma a un material encontrado como el sílex. La forma definía la función de una flecha, un rascador, un hacha, un cuchillo. La historia del progreso de la tecnología se medía por el logro de mejores filos y mejores puntas, mejores en el sentido de mayor poder de concentración de fuerzas (mayor presión por menor superficie) y mejores en el sentido de mayor resistencia. El reto tiene su gracia, pues ambos avances parecen contradecirse. Las puntas de flecha de piedra debían

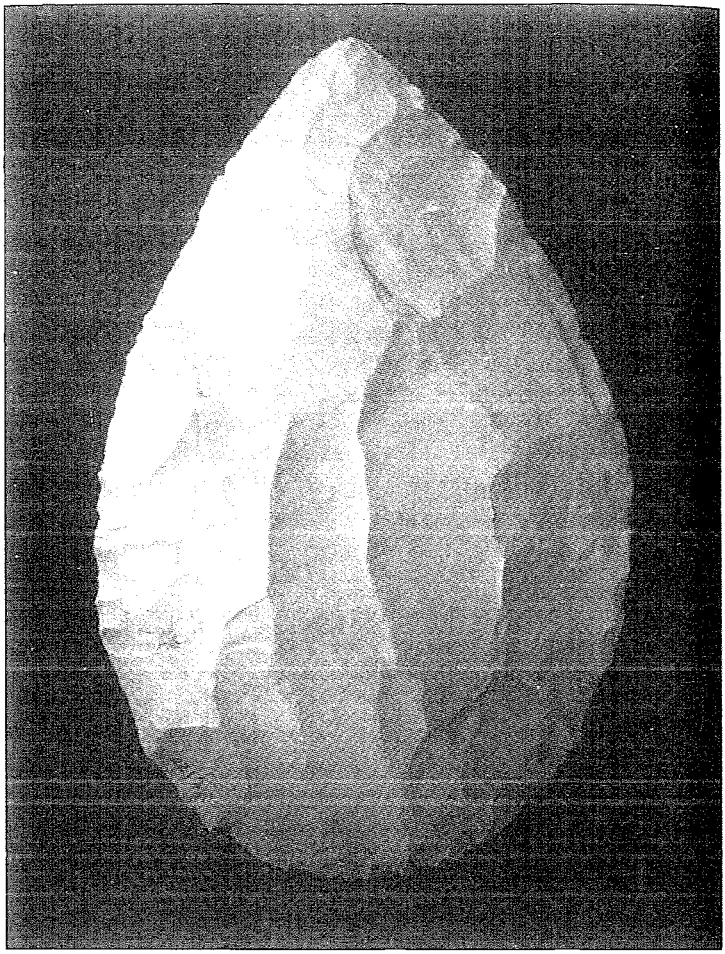


Figura 14.5. Bifaz musteriense (Paleolítico medio, entre 120.000 y 600.000 años) procedente de la Dordoña, Francia. Para pinchar, cortar, perforar y rascar conviene concentrar fuerzas en un filo o en una punta (fotografía de Denis Dairat).

de romperse y perderse con mucha facilidad. Una línea de progreso consiste en la mejora de los materiales: el hueso, el bronce, el hierro, el acero... Otra es la mejora de las técnicas de afilado. Llegaron luego otras dos edades importantes. Una fue la edad de *transformar* la materia. Es la edad de las aleaciones, de la alquimia y de la química, una edad que llega hasta el mismísimo siglo XX de nuestra era. Hoy estamos en la edad de *inventar* la materia. En efecto, desde que podemos acceder al nivel molecular y atómico de la materia, podemos diseñar materiales a la carta, es decir, primero hacemos una lista de propiedades y luego buscamos un material, que no existe espontáneamente en la naturaleza, y tratamos de sintetizarlo. Sin embargo, basta darse una vuelta por una moderna ferretería para constatar que la punta y el filo siguen siendo (junto con la hélice de los tornillos) las formas más trascendentales para toda clase de (sub)funciones. Tampoco está de más darse una vuelta por un museo militar bien surtido, como el de Montjuïc, en Barcelona, para marearse con la diversidad de formas que se han inventado para bayonetas, dagas, sables, espadas y demás instrumentos de pinchar con más o menos fuerza y precisión.

La punta concentra otras cosas además de fuerzas, y la selección cultural lo sabe bien. La punta concentra cargas eléctricas. El efecto se usa en antenas y pararrayos. Pero la punta también tiene la función de concentrar la atención para muchas subfunciones interesantes. La punta afina la precisión de ciertos movimientos. Es cosa de especialistas. Las pinzas, por ejemplo, sirven para asir y en ocasiones interesa asir algo con velocidad y extrema precisión. La selección natural también lo sabe bien. Basta atender a la forma de los picos de los pájaros. El pico de un gorrión o de una gallina no es demasiado afilado. No son especialistas. Más bien al contrario. Pican de todo. Sin embargo, una garceta blanca, y tantas otras aves acuáticas, deben acertar a un pez desde fuera del agua a la primera (no hay muchas segundas oportunidades de una misma presa). Su pico es más largo y afilado. En los archivos del Museo de Historia Natural de Belo Horizonte (Brasil) hay una irrepetible colección de mandíbulas del orden más diverso de mamíferos, los xenartros, desde los extintos y temibles perezosos gigantes (el *Eremotherium clavicaudatus)* hasta los simpáticos osos hormigueros. No sería difícil ordenar la especialización por la agudeza de sus mandíbulas. Cuando se trata de recoger cualquier cosa, el recogedor

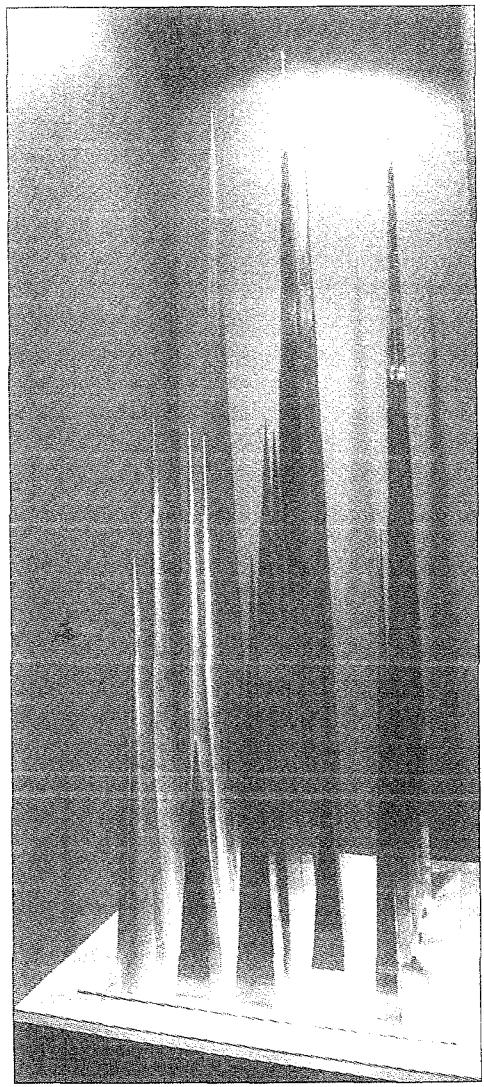


Figura 14.6. Escultura de Xavier Corberó. O la obsesión por la punta perfecta... (fotografía de Sergio Parra).

frontal es romo. A medida que crece la necesidad de seleccionar lo que se recoge, el recogedor se agudiza. El oso hormiguero, como su nombre indica, es ya el colmo de la precisión y la especialización. La selección cultural converge también en este detalle. Un vistazo a la forma de unas pinzas basta para adivinar el grado de especialización y precisión para el que se han diseñado.

Otro instrumento culto de precisión se usa para concentrar (o retirar) cierto material sobre una superficie. Es el problema que crea una de las prestaciones más prestigiosas del ser humano que marca la frontera entre su prehistoria y su historia: la escritura. Del cincel para grabados rupestres o jeroglíficos al instrumento para dibujar signos cuneiformes en el barro fresco, a la pluma de ave para escribir con tinta, la estilográfica o la moderna impresora de inyección, a la hora de la verdad, todos usan una punta para escribir. El bolígrafo aúna la esfera para rodar con su mínimo tamaño, que hace que además de esfera sea punta.

Sobre el ángulo y la punta en arquitectura podría escribirse más de un libro. Piénsese sólo en los remates de tantas casas y rascacielos. El clásico tejado que pintan los niños en sus dibujos es un ángulo invertido que cumple la función inversa de concentrar (dispersar la nieve y el agua). El arte también rinde homenaje al concepto «punta». Citaré un solo caso que me conmueve: la escultura de Xavier Corberó, *Pirámides y Conos* (figura 14.6). Todo empieza en una cena en el irrepetible taller-vivienda-fundación del artista y acaba con esta magnífica pieza que ilustra la punta culta en la exposición del museo.

En suma, donde hay punta hay concentración y, con frecuencia, alguna clase de penetración. Moverse a través del aire o del agua requiere penetrar en el aire o en el agua. Un cohete, una embarcación, un avión, etcétera (que no una nave espacial) necesitan penetrar un fluido. Es el caso de una bala, una flecha, un pájaro o un pez. La forma particular de sus puntas no dejará muchas dudas sobre las velocidades que pretende alcanzar en sus desplazamientos. Todo eso, y no otra cosa, es empezar a comprender las puntas.

15
La onda comunica...

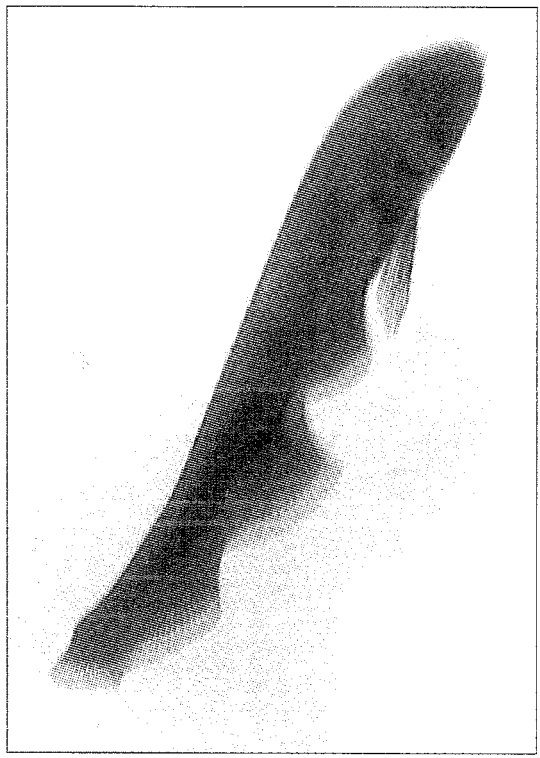


Figura 15.1. Ondas laterales de un pez nadando. Todos los peces y reptiles se mueven según ondas transversales. Todos los mamíferos acuáticos nadan según ondas transversales verticales. Los gusanos se desplazan según ondas longitudinales (fotografía del autor).

El universo está casi vacío. Por término medio, en esta enorme realidad existe un átomo por cada dieciséis metros cúbicos de espacio. La densidad media es de 2×10^{26} kg/m^3, unas 10^{27} veces menos que la densidad media de nuestro planeta. Pero lo importante es su transparencia al paso de fotones. Hay unos 500 millones de fotones por metro cúbico. La luz que nos llega de estrellas y galaxias es radiación electromagnética. En otras palabras, desde que el universo se hizo transparente, poco tiempo después de su nacimiento, la selección fundamental ha permitido que las ondas trasladaran la energía por el espacio. Así llega la energía a la Tierra, la energía que necesita la vida y la energía que alimenta la incertidumbre de su entorno agitando la atmósfera y los océanos. La radiación solar es la onda fundamental más relevante de nuestra realidad y su función primera es desplazar la energía. No hay perturbación en el planeta que no se desplace según las leyes del movimiento ondulatorio.

El mundo inerte está plagado de ondas de todas clases propagándose en todas direcciones. Cuando en las entrañas de la Tierra una masa se desliza sobre otra, se generan ondas sísmicas que estremecen la superficie y que se detectan en cualquier punto de la esfera planetaria. La energía del sol crea gradientes de temperatura que generan vientos que arrancan ondas en la superficie de mares y océanos, ondas que con frecuencia quedan *grabadas* en la arena del fondo del mar o de las playas cuando baja la marea. Incluso existen fósiles de este fenómeno correspondientes a épocas remotísimas. Cuando un cuerpo golpea a otro se generan vibraciones que se propagan a través del aire. Es el sonido. El sonido, claro, es anterior a cualquier dispositivo, natural o artificial, capaz de percibirlo, medirlo o interpretarlo. El sonido se propaga según ondas longitudinales, es decir, ondas en el plano que contiene la propia dirección de propagación. En contraste, la luz se propaga según ondas transversales, es decir, ondas en planos perpendiculares a la dirección de propagación. Para que suene, un instrumento musical tiene que hacer vibrar algo, una membrana, una cuerda, una columna de aire... Se puede ver con facilidad la onda que genera la vibración de una cuerda tensada entre dos puntos (como la de un violín o una guitarra). Basta iluminar el fenómeno con una luz estroboscópica con la frecuencia apropiada. En el mundo inerte, las ondas desplazan energía de todas clases, energía lumínica, energía sonora y en ocasiones, incluso materia...

Un caso sorprendente de desplazamiento ondulatorio en la materia inerte ya lo hemos citado con ocasión de otra forma, la espiral. Se trata de la reacción de Belousov-Zhabotinski. No es un transporte en el sentido usual del término, transporte físico de moléculas de un lado a otro. Una variable, que representa la concentración de cierto producto químico, sigue una onda que se propaga en el espacio como lo haría la onda provocada por el impacto de una piedra en un estanque tranquilo. La concentración de la sustancia en un punto del espacio cambia por dos razones: porque se ha generado o consumido en un proceso químico, o porque se ha difundido (ha llegado o ha emigrado) desde las inmediaciones de ese punto. Se llaman fenómenos de reacción-difusión. Son bien conocidos en la termodinámica del no equilibrio porque, dadas unas especiales condiciones iniciales y de contorno, el sistema puede entrar en un régimen ordenado y coherente a partir de una situación de flagrante desorden. Los físicos suelen describir estas situaciones, quizá con excesivo entusiasmo, como la emergencia del orden a partir del caos. La reacción de Belousov-Zhabotinski es ciertamente espectacular y uno tiene la sensación, cuando la contempla, del riesgo que comportaría ofrecer una demostración a los amigos en la Edad Media, incluso en algunos ambientes del Renacimiento. El proceso podría interesar en efecto a los delatores de la Santa Inquisición y uno podría dar fácilmente con sus huesos en la hoguera. Si se cuidan las concentraciones (críticas) impuestas desde el exterior, en el reactor nace y se desarrolla una forma de orden a partir de fluctuaciones espontáneas desordenadas. Son ondas químicas cuyas evoluciones parecen contradecir nuestras intuiciones alimentadas por los procesos que tienen a bien respetar el segundo principio de la termodinámica. Las especies químicas protagonistas son los iones de cerio, Ce^{+3} y Ce^{+4}, que pueden visualizarse con ferroína, de modo que la presencia de uno de los iones se observa de color rojo y la otra de color azul. Cuando se inicia la reacción, que involucra el ácido malónico, el contenido del reactor se observa transparente e incoloro. Sin embargo, afinando las condiciones de contorno, empiezan a aparecer y desaparecer nubecitas rojas y azules en distintos puntos del espacio. Se diría que la materia inerte respira. El ritmo se afianza poco a poco y el sistema deriva paulatinamente a un estado estacionario lleno de caprichosas espirales. La termodinámica del equilibrio anuncia procesos del orden al caos, pero

en un sistema abierto y sin violar ninguna ley fundamental ocurre lo contrario, del caos al orden. ¡La materia inerte se ordena espontáneamente! [55]

El fenómeno consiste en la generación de una onda química de concentración que luego se propaga por el espacio. En ciertas condiciones (de lo que hemos llamado la nervura de lo real en la primera parte), el sistema entra en un régimen de orden. Entre otras cosas, aparecen correlaciones espaciales en un sistema que antes era una sopa homogénea. En otras palabras: emerge una armonía, una clase de coherencia entre las distintas partes de un todo. Se puede decir, sin abusar del lenguaje, que puntos distantes en el espacio se comunican químicamente, o sea, se comunican mediante una onda química. En este caso, la onda desplaza información, como mínimo eso. Quizá se inicie así el camino de una nueva *individualidad,* porque tal coherencia ocurre dentro del sistema y no fuera de él. La selección fundamental hace que la estabilidad del sistema requiera una onda que *mueva* la concentración de una sustancia, que la estabilidad (en este caso un auténtico estado estacionario termodinámico de no equilibrio) implique la comunicación entre las partes. No hay duda. En el mundo inerte, la onda mueve y, en consecuencia, a veces comunica...

Al nadar, los peces, todos los peces sin excepción, avanzan moviendo el cuerpo (sobre todo, la cola) según ondas transversales laterales (véase la figura 15.1 al comienzo de este capítulo). Más que eso: lo mismo hacen todos los reptiles. Se repta según una onda lateral. Al nadar, los mamíferos acuáticos avanzan moviendo el cuerpo (sobre todo la cola) según ondas transversales verticales. Y los gusanos, en general, avanzan contrayendo y dilatando el cuerpo según ondas longitudinales, en el sentido del movimiento.

Hay un detalle de gran trascendencia para que la realidad ofrezca una opción a la selección fundamental de ondas. Se trata del carácter extremadamente crítico del tamaño del escenario para que la onda emerja. En efecto, si el reactor es demasiado pequeño, el comportamiento ondulatorio no aparece. Tampoco si es demasiado grande. Y el margen es relativamente estrecho. Por todo ello, la onda química no es demasiado probable en la realidad inerte. Por eso es extraordinario, por eso nos hace reír o nos asusta la primera vez que lo vemos (otra idea interesante de Feynman: si algo nos hace reír, como un bañista que

emerge de la piscina y acaba seco en el trampolín con los brazos en cruz, es porque viola o burla nuestra intuición de las leyes fundamentales de la naturaleza). Según el esquema conceptual de la primera parte, diríamos que la Constitución de la realidad en la que emergen las ondas es muy estrecha. Quizá la selección natural cambie las cosas. Quizá la selección natural distorsione la criticalidad de la realidad inerte para que en ella aumente la emergencia de ondas y de orden.

En el mundo inerte, las ondas químicas son muy improbables. La buena pregunta ahora es: ¿lo son menos en el mundo vivo? Es decir: ¿favorece la selección natural la consolidación de ondas químicas? Y otra buena pregunta: ¿cuál es la función más frecuente de una onda química en la materia viva?; ¿sigue siendo generar orden, desplazar o comunicar? Empezamos a comprender la onda.

Existen algunos casos extraordinarios de ondas químicas en sistemas vivos. El más conocido es sin duda el microorganismo *Dictyostelium discoideum,* que se agrega formando unas espirales características muy similares a las que se observan en la reacción de Belousov-Zhabotinsky cuando ésta tiene lugar en la geometría plana y simétrica de, por ejemplo, una placa de Petri. Tales pautas son la traducción a mayor escala de la comunicación química que se establece entre las amebas mediante una sustancia llamada AMP cíclico. Cada ameba actúa aquí como un punto del espacio que define una coherencia mayor, la del agregado, un agregado que no es un simple montón de células, sino una nueva estructura de acaso un nivel superior de la jerarquía biológica. ¿Estamos ante un camino para escalar la complejidad hacia los niveles organísmicos? El papel de la selección natural favoreciendo ondas que comunican el espacio interior de una nueva individualidad parece trascendente. Pero lo extraordinario de las ondas químicas en el mundo vivo es justamente el hecho de que se hagan ordinarias. Un ciclo tan general y frecuente del metabolismo microbiano como el de la glucólisis presenta un comportamiento muy similar al descrito. Primero, en 1972, se describieron las soluciones en forma de ondas químicas de las ecuaciones de reacción-difusión [56] y luego, en 1974, ¡se detectaron en el laboratorio para estrechas condiciones de contorno! [57]. Es el máximo gozo en ciencia, anticiparse a la realidad con una teoría.

El ciclo de la glucólisis no sólo es esencial para el mantenimiento de la vida en este nivel fundamental, también sirve para comunicar quí-

micamente unas células con otras y, quizá, a la larga, para crear un superorganismo bacteriano. Durante los trabajos para mi tesis doctoral tuve la ocasión de comprobar, con la ayuda de un microcalorímetro de precisión que nos construimos en el propio laboratorio, cómo una población de bacterias adoptaba un ritmo químico colectivo. Lo más notable (y al mismo tiempo sensato) es que las bacterias no inventan una química nueva o especial para ello. Usan su propio metabolismo. Con él crean ondas y se sincronizan para constituir un agregado cuando las condiciones ambientales se hacen demasiado desfavorables [47]. Atención: la selección natural actúa sobre un resultado de la selección fundamental con posibilidades para un salto progresivo hacia un superorganismo. El fenómeno se parece a la pelota de bacterias magnetotácticas del equipo de Henrique Lins. Al igual que las reacciones de Belousov-Zhabotinski, el fenómeno se vuelve estable sobre una distancia característica de unos centímetros, acaso la pista del tamaño de una presunta nueva individualidad. Las ondas químicas son, en efecto, muy frecuentes en la realidad viva. La selección natural las favorece y crea con ello capacidad para comunicar y para generar nuevas estructuras de interés evolutivo.

En la realidad del mundo vivo no es difícil encontrar otras clases de ondas. Una muy evidente es la que se refiere a la locomoción animal. Digamos, para empezar, que todos los peces y reptiles se desplazan moviendo el cuerpo según ondas laterales (perpendiculares a la dirección de desplazamiento en el plano horizontal). Es el caso de serpientes y peces. Un buen nadador humano de estilo libre, por ejemplo, no tira la mano hacia atrás en línea recta, sino trazando una suave onda en forma de letra ese. Es la manera de apoyar siempre la mano en agua no turbulenta para asegurar así el máximo impulso. En cambio, todos los mamíferos acuáticos nadan moviendo el cuerpo según una onda vertical (perpendicular a la dirección de desplazamiento, pero en el plano vertical). Y casi todos los gusanos se desplazan moviendo el cuerpo según ondas longitudinales, o sea, en su misma dirección de desplazamiento, adelante y atrás. La onda desplaza, también aquí, por gracia de la selección natural.

Los seres vivos, para independizarse de su entorno, tienen la capacidad de controlar su incertidumbre. Y el control requiere percepción. He aquí el genuino sentido del concepto autoorganización. Pues bien,

la percepción de por lo menos tres de los sentidos está protagonizada por la capacidad para detectar e interpretar toda clase de ondas. Una función parece clara: el control de la información. El sonido, la vista y el tacto son tres sentidos capaces de percibir ondas de presión, electromagnéticas y vibraciones. Los extremos más impensables del espectro también se han beneficiado de la selección natural. Los murciélagos, con su sónar de ultrasonidos; los mamíferos marinos, con su amplia gama de frecuencias, las serpientes con sus infrarrojos, la riquísima gama de colores de la vista de ciertos pájaros (sobre todo los comedores de fruta) o la sensibilidad a las vibraciones de las arañas son sólo una muestra del papel central de la comunicación por ondas a la hora de comer y no ser comido. La comunicación es una función con gran continuidad en la selección natural y la selección cultural.

En la realidad culta la onda también desplaza y, sobre todo, comunica. Empecemos por los vestigios más antiguos de ondas de origen humano. Una de las cosas que más me maravillaron la primera vez que visité un museo de arqueología fue el aspecto de las piezas de industria lítica más antiguas: hachas, cuchillos, puntas de flecha... Durante nuestras excursiones por los desiertos del Magreb me asaltaba la siguiente reflexión: casi cada piedra que veo por el suelo tiene aspecto de una pieza de industria lítica como las que se observan en las vitrinas de los museos. Ésta por ejemplo. ¿Cómo sé que no se trata de una simple piedra?, ¿cómo se sabe que la forma es diseñada y no accidental?

Pronto supe de un truco casi infalible para distinguir una piedra espontánea de otra trabajada: las ondas de percusión. Una percusión precisa sobre una piedra, destinada a darle forma, deja huellas en la piedra: son las ondas de percusión. Se parecen a las circunferencias concéntricas que crea un guijarro lanzado a un estanque. El centro denuncia además el punto exacto del impacto. No hace falta decir lo improbable que resulta que un episodio así se dé por casualidad. Recomiendo la experiencia de buscar ondas de percusión en las piedras de lugares poco transitados. Sorprende el enorme número de piedras del desierto que son algo y no nada. Las cuentas salen a pesar de todo, porque muchos son, en efecto, los años durante los que se fabricó industria lítica, muy frágiles al uso son las herramientas de piedra y, por último, se entiende que, en las condiciones de la época debía de ser preferible fabricarse nuevas herramientas a transportarlas. Las ondas

de percusión visibles en la industria lítica son ondas de selección fundamental por selección cultural. Pero nuestra atmósfera actual está acribillada por las ondas de selección cultural.

No es necesario insistir mucho en eso: ondas de radio, televisión, telefonía móvil, ruido... Su trascendencia cultural es tan grande y singular que todo proyecto de detectar vida inteligente extraterrestre pasa, justamente, por analizar las características de las ondas que puedan alcanzar nuestro planeta desde el cosmos. Hablemos, ya que hemos adquirido la costumbre, de arquitectura.

Y, para variar, hablemos un poco de Gaudí. El edificio de La Pedrera en el Paseo de Gracia de Barcelona exhibe ondas en la pared de la escalera de servicio (véase, más adelante, la figura 19.14). Se diría que es más fácil subir y bajar. Pero las ondas más espectaculares están en la fachada de este edificio. Se suele decir que Gaudí quiso evocar las olas del mar. Puede ser. Pero quizá sea algo más que eso. Basta asomarse a cualquier balcón del edificio o, simplemente, observar la fachada desde la calle (véase, más adelante, la figura 19.15). La sensación es que el edificio se mueve (!) respecto de los edificios colindantes. Gaudí usa las ondas para convertir un inmueble en un móvil. La onda, ahora por selección cultural, mueve. Otro ejemplo gaudiniano: el estucado de la pared que acompaña la escalera del mismo edificio dibuja una onda siempre irrepetible. Resultado: la sensación es de bajar más deprisa o de subir con menos dificultad. Tercer ejemplo en el mismo edificio, la techumbre de las oficinas de la planta baja imita las ondas dejadas por el mar en la arena (véase, más adelante, la figura 19.17). Cuarto ejemplo: los escalones del jardín del Parque Güell presentan ondas horizontales (véase, más adelante, la figura 19.16). En un principio pensé que se trataba de la erosión provocada por el tránsito tenaz de tantos visitantes. Pues no. Se trata de una selección cultural y expresa de Gaudí. Me imagino a Gaudí supervisando la labor artesanal de un operario sorprendido, y un tanto fastidiado, por tan extrañas y minuciosas instrucciones. Gaudí era sin duda uno de los pocos arquitectos de la historia que huía de la línea recta. En cierta arquitectura de vanguardia la tendencia ya no es tan rara. La verdad es que en la naturaleza apenas si hay líneas rectas. Quizá sólo la línea del horizonte marino, una ilusión de línea recta. También aparecen algunas líneas rectas en el mundo de la cristalización de los minerales, aunque

son consecuencia del mundo microscópico de la estructura atómica y molecular. En cambio, pocas rectas, quizá ninguna, pueden encontrarse en el vasto y diverso mundo de la arquitectura animal. La selección fundamental favorece poco la línea recta, menos aún la natural. Sin embargo, la línea recta seduce la selección cultural. En el epílogo retomamos esta cuestión.

En suma, la onda mueve. Mueve la materia, mueve la energía y mueve la información. Por lo tanto, la onda también emite, recibe, comunica... Eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la onda.

16
La parábola emite y recibe...

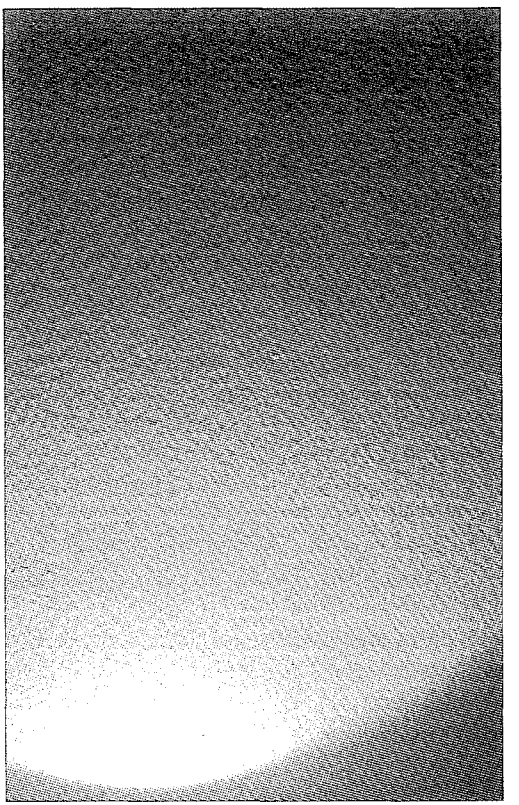


Figura 16.1. Parábola de luz. Es la intersección de una superficie cónica en cuyo vértice está el foco de luz, con el plano de la pared (fotografía del autor).

Se puede obtener una parábola cortando una superficie cónica por un plano paralelo a cualquiera de las directrices del cono. A veces se ven parábolas de luz en las paredes de una habitación iluminada con múltiples fuentes de luz (figura 16.1). Es cuando la pared es paralela a alguna de las directrices del cono en cuyo vértice hay una fuente puntual de luz. Pero la propiedad más sobresaliente de una parábola plana (tanto que se puede usar como definición) es la siguiente: cualquier recta paralela al eje de simetría que incida en la curva (lo que equivale a cualquier rayo que proceda del infinito) se refleja (ángulo de incidencia igual a ángulo de reflexión) pasando por un solo mismo punto: el llamado foco de la parábola. Lo mismo ocurre con un paraboloide de revolución. Es la superficie que se obtiene haciendo girar la parábola alrededor de su eje. De aquí surge algo que bien podría interesar a una selección natural o cultural. Todo lo que llega del infinito se concentra en un punto. Y viceversa, todo lo que sale de ese punto se envía fácilmente al infinito. Dicho en otras palabras, las parábolas son formas idóneas para emitir y para recibir. En algunos museos de ciencia existe una suerte de billar con pared parabólica y un orificio en el lugar que ocupa el foco. El visitante puede experimentar a placer lanzando bolas paralelamente al eje de simetría. La verdad es que uno se siente un experto del juego de billar porque las bolas se cuelan siempre por el agujero, al tiempo que comprende el porqué de tanta antena parabólica, el porqué de tanto espejo parabólico para telescopios astronómicos, la razón de las gigantescas antenas parabólicas en telescopios de radioastronomía, el porqué de algunas pantallas parabólicas en estufas cuya resistencia está en el foco o pantallas parabólicas en proyectores de luz cuyo filamento se encuentra asimismo en el foco, etcétera. La selección cultural de las parábolas no deja muchas dudas. Son para emitir y son para recibir.

Otra experiencia omnipresente en los museos de ciencia es aún más espectacular. Dos grandes pantallas, con forma de paraboloide de revolución, se enfrentan a una considerable distancia que en ocasiones llega hasta los cien metros. El fenómeno consiste en murmurar algo a la altura del foco de una de las pantallas para que otro visitante escuche con nitidez las palabras pronunciadas a tan larga distancia, si sitúa su oído a la altura del foco de la otra pantalla. El efecto funciona incluso en exteriores con fuerte ruido ambiental. La primera pantalla

envía el sonido que emana de su foco, sonido que recoge la segunda pantalla y concentra en el suyo. Las parábolas emiten y reciben con ventaja. Seleccionan las señales de foco a foco. Alguien me comentó una vez, aunque nunca lo he comprobado en un caso concreto, que en ciertas catedrales el fenómeno se da entre hornacinas parabólicas muy distantes entre sí. Esto permitiría situaciones de cierta picaresca. Por ejemplo, dos jóvenes novicios cuchicheando picardías durante la celebración de las más solemnes y ruidosas ceremonias...

En el mundo vivo también se encuentran algunas formas paraboloides con parecida función, especialmente en los pabellones auditivos de algunos mamíferos especializados en captar los sonidos más imperceptibles de la noche: conejos, zorros, murciélagos... Sin embargo, la frecuencia de esta forma parece significativamente menor que en el mundo culto. Me apresuro a corregir: lo que escasea en el mundo vivo es la parábola con la función de emitir y recibir. Porque la verdad es que el mundo vivo está preñado de parábolas. Cada segundo ocurren millones de parábolas en la superficie del planeta, porque aproximadamente parabólico es el movimiento de un grave abandonado a su suerte en un campo de gravedad constante (sólo alterado, no muy significativamente en general, por el efecto de la resistencia del aire). Para visualizar la trayectoria parabólica entera basta sostener una manguera y observar la curva que traza el chorro de agua. Se trata, en rigor, de una necesidad de las leyes de Newton. Es un producto de la selección fundamental en su sentido más estricto. La trayectoria queda perfectamente determinada con sólo dos datos: la posición y la velocidad del móvil en un punto cualquiera de la trayectoria (por ejemplo, el inicial). En el Museo de la Ciencia de Florencia hay un ingenio (si no recuerdo mal, diseñado por el propio Galileo) diseñado para impresionar al visitante con la predicción de un tiro parabólico. Se trata de una rampa por la que puede bajar acelerándose una bola de acero. El desnivel de la rampa determina perfectamente el módulo de la velocidad adquirida por el bólido y la forma del último tramo su dirección. Con esto quedan completamente determinadas tanto la posición inicial (punto final de la rampa) como la velocidad inicial del bólido en el momento de iniciarse la parábola. Basta, pues, situar unas cuantas arandelas (de un diámetro ligeramente superior al de la bola proyectil) a lo largo de la trayectoria parabólica para conseguir el efecto. El visitante puede repe-

tir la experiencia cuantas veces quiera, la bola se precipitará rampa abajo y saltará al vacío iniciando un vuelo parabólico que pasa por el centro de todas y cada una de las arandelas: la bola pasará por ellas sin tocarlas como si estuviera amaestrada. La parábola del tiro libre es una forma que se comprende bien. Todos los saltos y lanzamientos tienen algo en común: la parábola. Casi todas las pruebas olímpicas de atletismo se reducen a parábolas. La inteligibilidad del *citius, altius, fortius* es la parábola. Casi todo el entrenamiento de un atleta se concentra en conseguir unas condiciones iniciales (posición y velocidad). Cuando el lanzador suelta el peso, cuando el saltador de longitud ha consumado la batida, ya ha hecho casi todo lo que tenía o podía hacer. El resto es cosa de Newton. Correr es algo más entretenido. Cada paso es una parábola, en cada paso la musculatura crea nuevas condiciones iniciales para una nueva parábola. Es, claro, el caso de cualquier objeto vivo que corra o salte.

¿Existen parábolas en el mundo inerte? Además de parábolas de tiro libre en campos de gravedad constante, como las que acabamos de describir, no existen muchas más. La parábola es también una de las soluciones posibles, según la mecánica clásica, para el movimiento de un objeto en un campo gravitatorio como el que crea la estrella de un sistema planetario. Sin embargo, las parábolas requieren unas condiciones iniciales muy especiales. Si la energía total del móvil es negativa, la trayectoria es una elipse, como la que describen los planetas o algún cometa alrededor del Sol; si la energía total es positiva, la trayectoria es una rama de hipérbola, es decir, viene del infinito, se acerca una vez al Sol y se pierde de nuevo hacia el infinito para siempre. La parábola corresponde a una energía total exactamente igual a cero, un caso entre infinitos. Algún asteroide o cometa puede tener una trayectoria aproximadamente parabólica. El mundo inerte, como vemos, es pobre en parábolas.

En suma, la parábola, poco favorecida por la selección fundamental, mejora con la selección natural y triunfa gracias a la creatividad humana. Gaudí, que lo probó casi todo, también experimentó con arcos parabólicos. La parábola concentra lo que llega del infinito, o manda al infinito lo que se irradia de su foco. Eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la parábola.

17
La catenaria aguanta...

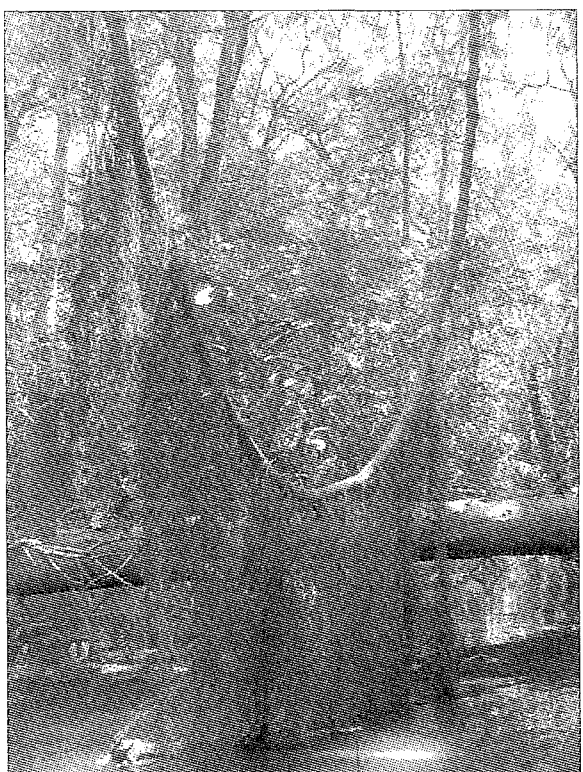


Figura 17.1. Liana colgando según una catenaria en la selva brasileña. La catenaria acomoda la forma de una densidad lineal de masa a su propio peso (fotografía del autor).

Para admirar la forma de esta curva basta fijar una cadena, una cuerda o un cable (una densidad lineal de masa) por dos puntos en un campo de gravedad constante. El resto es cosa de la selección fundamental. El cable, o similar, adoptará la forma que hace que cada uno de sus puntos esté en equilibrio mecánico, es decir, una curva en la que todas las fuerzas que actúan sobre un punto (su peso y las tensiones debidas a los dos puntos contiguos anterior y posterior) se anulan entre sí. Dicho de otro modo, la catenaria es la forma que adopta un cuerpo para no soportar ninguna tensión suplementaria. Es la situación de máximo descanso, de mínima rigidez. La catenaria es muy rara en el mundo inerte porque muy raro es un objeto espontáneamente filiforme que, además, penda de dos puntos. En la realidad viva es algo más frecuente. Una liana en plena selva, por ejemplo, se puede encontrar ocasionalmente en esta situación (figura 17.1). Quizá, como veremos, se pueda especular con algún caso más.

En el caso de la catenaria empezaremos por la selección cultural. Con la hélice la humanidad inventó hilos, cuerdas y cables. Y con éstos el paisaje humano (la realidad humana) se pobló de catenarias: en los barcos de vela, en los tendidos de alta tensión y líneas telefónicas, en las barreras improvisadas en teatros y cines para conducir una cola de gente que espera, etcétera. El caso más interesante de catenaria creativa se encuentra en la arquitectura. Y el caso casi único del uso de la catenaria en arquitectura es Gaudí [58]. Ya hemos tenido ocasión de demostrar que Gaudí fue un gran observador de la naturaleza, quizá fuese incluso un gran naturalista. Sin embargo, dado que la catenaria se prodiga poco en la naturaleza, hay que pensar que, en este caso, Gaudí se inspiró más observando los cables y cuerdas de la actividad humana, quizá durante las visitas de obra de sus propias construcciones. Su razonamiento debió de ser más o menos así: si una cadena que pende por gravedad trabaja por tracción, un arco que soporta una estructura trabaja por compresión. Se trata de la misma cuestión invertida. Péndase una cadena y obsérvese su reflexión invertida en un espejo. ¡Ya tenemos una buena propuesta que experimentar para la forma del concepto «arco»! El método se sofisticó inmediatamente introduciendo como pesos lo que en una construcción debían ser cargas. El arquitecto Jaume Serrallonga [59] ha realizado una cuidadosa investigación entre los profesores que tuvo Gaudí, y, la verdad, la idea le pudo

venir directamente de alguno de los buenos cursos de matemáticas a los que asistió. Pero veamos, en un viaje rapidísimo, lo que pudo suponer la introducción de la catenaria en arquitectura.

Tomemos como referencia la necesidad histórica de construir templos. Un templo es un edificio que necesita ser amplio y alto de techo. Debe ser amplio porque necesita acoger un buen número de personas con una identidad colectiva común. Y debe espirar verticalmente porque la altura remite las almas de los presentes a la contemplación (¿y temor?) de la divinidad. En los comienzos de la humanidad, la tecnología disponible debía de permitir poco más que una piedra horizontal sostenida por dos piedras verticales. Algo es algo. El arco de medio punto romano supuso un buen avance. En los templos ya podían reunirse algunos fieles con cierta dignidad en un ambiente razonablemente solemne. Los arquitectos góticos se exigieron mucho más y levantaron catedrales de más de cien metros de altura. Se diría que las yemas de las puntas de sus torres pretenden tocar el cielo. En su interior el ambiente es sobrecogedor. Sin embargo, la estabilidad de estas estructuras implica el auxilio de otro concepto arquitectónico: los contrafuertes. Para muchos los contrafuertes son un motivo estético más, pero la verdad es que no dejan de ser una especie de ortopedia hecha de piedra que resta esbeltez (¡y espiritualidad ascendente!) a la construcción. Y llega Gaudí con sus catenarias para proponer la catedral de la Sagrada Familia en Barcelona, un templo que se levanta vertical y limpiamente por encima de los ciento cincuenta metros. Ningún accesorio lateral se disculpa por la altura alcanzada. Gaudí comprendió la catenaria y la usó en bellísimas series en muchos edificios que aún se pueden admirar (véase, más adelante, la figura 19.18). Sin ánimo de exagerar quizá pueda exclamarse: neolítico, Roma, gótico... ¡y Gaudí! La ingeniería de puentes recoge la catenaria como una forma fundamental. ¿Por qué no dejó Gaudí escuela en arquitectura? Pero éste es otro tema.

Las catenarias de Gaudí suponen un caso genuino de selección cultural, pues este arquitecto experimentó muchas otras formas de arco. Ensayó, por ejemplo, el arco parabólico y el arco hiperbólico. Sin embargo, la catenaria acabó por imponerse con rotundidad. Y se comprende por qué. Si la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, la punta penetra, la onda comunica, la pa-

rábola emite y recibe, la catenaria, prioritariamente, soporta estructuras; la catenaria aguanta. Ésa es su inteligibilidad en el mundo culto, ésa es la función que explica la frecuencia de la catenaria en el paisaje humano. Pero hay una pregunta que, al llegar a este preciso punto, se formula por sí sola: ¿y en el mundo vivo? ¿No será que la selección natural favorece también las formas catenarias en las grandes estructuras? ¿Pueden observarse formas catenarias en los grandes caparazones y los grandes esqueletos? ¿Plagiaron estas estructuras naturales a Gaudí *avant la lettre?*

El Museo Perito Moreno de La Plata es muy singular. Es único, por ejemplo, en lo que respecta a la megafauna argentina del Pleistoceno, como los perezosos gigantes, el célebre megaterio, y los armadillos gigantes, los no menos célebres gliptodontes. Este último es una buena ilustración de casi todas las formas que hemos elegido aquí. Tiene hexágonos para pavimentar su caparazón, púas en la cola y garras en las patas para penetrar la carne de sus enemigos, y algunas especies tienen el caparazón articulado para agilizar al máximo la armadura y para adoptar la forma esférica si de lo que se trata es de optimizar la protección...

Antes de dar la conferencia que me había llevado por segunda vez al museo, visito las salas de exposición y la biblioteca. Hay una forma que empieza a fijarse en mi mente: el perfil del caparazón y del esqueleto de los gliptodontes. ¿Serán catenarias? Se puede improvisar una primera comprobación... Nada más acabar la conferencia vuelvo a la sala de los gliptodontes a fotografiar caparazones y esqueletos. Luego acudo a la biblioteca donde mis colegas me muestran libros antiguos con bellísimas láminas que reproducen fotografías y grabados de todas las especies descritas. Lo fotografío todo. Unas horas después estoy sentado en el borde de la cama de la habitación de Buenos Aires. He hecho algunos preparativos con lo que tengo a mano: la mejor fotografía, tomada de perfil, del mayor de los gliptodontes ya está en la pantalla del ordenador portátil justo frente a mí. Como no tengo ningún programa para invertir la imagen, lo que hago es darle la vuelta al ordenador portátil con ayuda de las gruesas guías telefónicas de la ciudad. Necesito también una cadena o similar, lo menos rígida posible, para la hora de la verdad: superponer la cadena, aguantada por dos puntos, al perfil del caparazón invertido. Me hago con una cadena sin

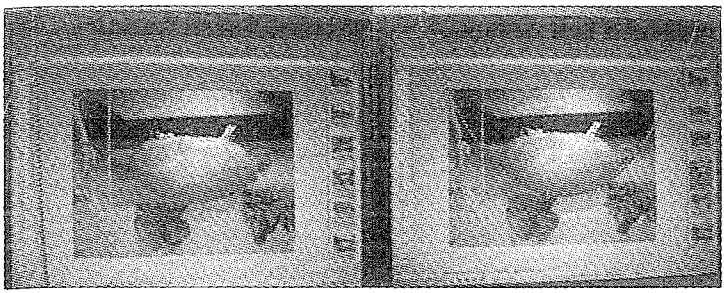


Figura 17.2. Caparazón invertido de gliptodonte del Museo Perito Moreno de La Plata (Argentina) para comprobar, al estilo Gaudí, su presunto ajuste a una curva catenaria (fotografía del autor).

salir de la habitación del hotel. No tengo más remedio que confesarlo: es una cadena hecha de bolitas engarzadas, la típica que suele asegurar el tapón de la bañera. Ya es mía. Ahora sólo faltaba acercarse con la cadena a la pantalla del ordenador en busca de una coincidencia. Es la hora de la verdad: un científico formula una pregunta a la naturaleza y percibe que la naturaleza no tiene más remedio que responder. Sí o no (figura 17.2). Hay pocos momentos en la vida de un científico comparables a una situación como ésta. Sólo hay un momento distinto comparable a éste. Y es justo el momento siguiente, cuando uno busca a alguien (poco importa quién sea) para contarlo todo. Pocos segundos después abría la habitación del hotel para otear los dos sentidos de la dirección del largo pasillo. Vaya, mala suerte, nadie a la vista para hacerle partícipe de la buena nueva. Ahora empieza el trabajo sistemático. Hay que recorrer los esqueletos y caparazones de los grandes individuos de un buen número de especies del presente y del pasado (figura 17.3). De aquí brotaría toda una interesante sugerencia museográfica: suspender un gliptodonte boca abajo en las salas del museo y permitir que el visitante compruebe por sí mismo, con la ayuda de una cadena, que el perfil del caparazón del animal coincide con una catenaria. Queda mucho trabajo por delante, porque las primeras impresiones pueden engañar. En particular, no hay que ser un gran matemático para darse cuenta de que un pedazo pequeño de catenaria siempre se ajusta a un pedazo pequeño de cualquier forma... y, ya

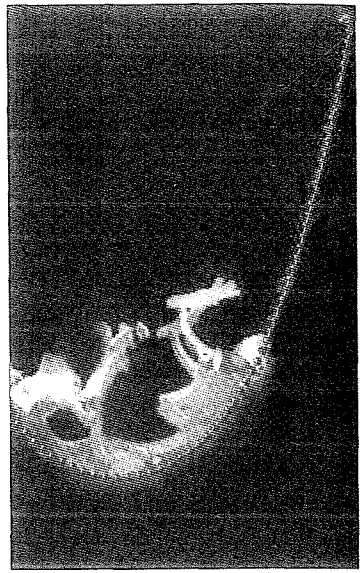


Figura 17.3. Esqueleto invertido de gliptodonte del Museo Perito Moreno de La Plata (Argentina). ¿Será que la selección natural favorece la catenaria para los grandes caparazones y esqueletos? (colección MCFLC, fotografía del autor).

lo sabemos, no se debe forzar a la naturaleza a encajar en nuestras teorías.

En suma, la catenaria aguanta, es buena para ahorrar material en grandes estructuras. La selección fundamental la insinúa, la selección natural la prueba y la selección cultural la selecciona, aunque más bien involuntariamente, en cadenas, cuerdas y cables. Eso, y no otra cosa, es empezar a comprender la catenaria.

18
Los fractales colonizan...

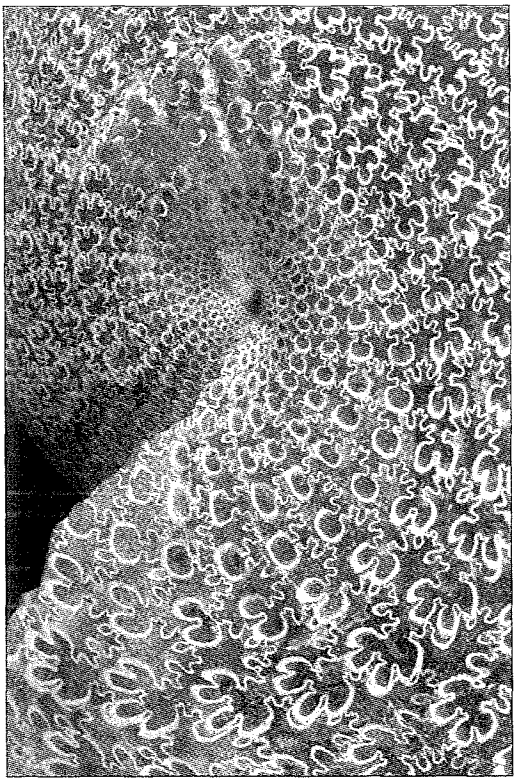


Figura 18.1. Formas fractales de los tabiques interiores de un amonite fósil. La fractalidad crece de dentro afuera de la espiral (colección MCFLC, fotografía de Sergio Parra).

Un relámpago (figura 18.2) y una coliflor (18.3) tienen algo en común. Son formas autosemejantes. Ambas figuras tienen partes que, debidamente ampliadas, se parecen al todo. Y lo mismo ocurre con las partes de las partes, respecto de sus propias partes... Y así sucesivamente hasta cierto número de veces. Son figuras *fractales*, figuras con un motivo que se propaga a escalas progresivamente reducidas. Es quizá la manera más simple de crear complejidad: iterando un patrón cierto número de veces en escenarios cada vez más pequeños. En el mundo vegetal, por ejemplo, no es raro observar fractales que iteran su autosimilitud hasta ocho y nueve veces. Es cuando una rama da el pego y se hace pasar por un árbol entero. Es cuando formar es, además, una manera de crecer, una manera de llenar el espacio. Una forma fractal no es entonces propiamente una forma sino más bien una familia, una

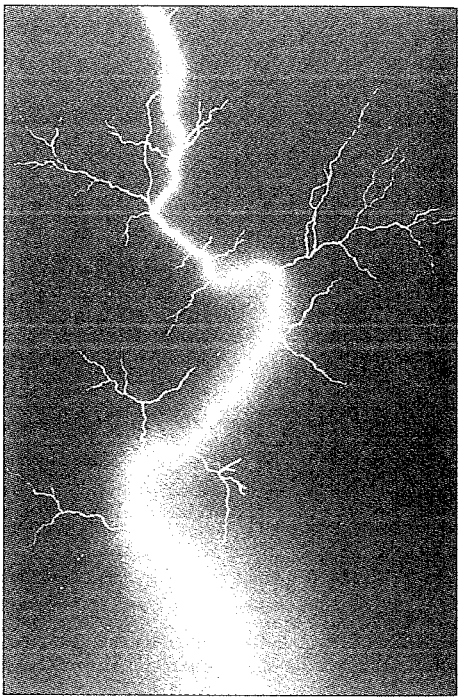


Figura 18.2. Rayo. Las descargas eléctricas en el aire son fractales por selección fundamental.

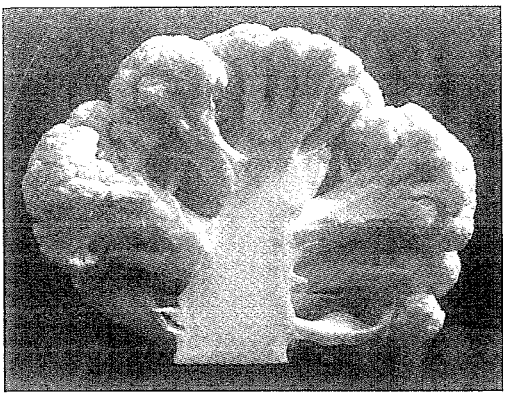


Figura 18.3. Una coliflor es fractal gracias a un complejo combinado de selecciones fundamentales, naturales y culturales (fotografía del autor).

clase de formas. Se llama *dimensión fractal* a un número que mide la capacidad de rellenar el espacio con cierto estilo especial. Un punto tiene dimensión cero, y es la manera de llenar el espacio que consiste en no llenarlo. Pero cuando éste se mueve con continuidad, entonces su estela engendra una línea, una figura de dimensión uno. Y así una línea puede viajar para crear una superficie, la dimensión dos, y una superficie un volumen, la dimensión tres. Pero hay otros modos no tan simples de llenar el espacio. Las dimensiones fractales intermedias, las dimensiones no enteras, pueden dar cuenta de formas que llenan el espacio más que un punto pero menos que una línea (dimensión fractal entre cero y uno) o más que una línea pero menos que una superficie (dimensión entre uno y dos) o más que una superficie pero menos que un volumen (entre dos y tres)...

Los fractales rellenan el espacio, pero ¿cómo rellenan los fractales la realidad? Profusamente. Sólo hay que observar nuestro entorno con *ojo fractal,* es decir, con la fractalidad en mente. Desde que Benoît Mandelbrot [60] y [61] introdujera su concepción matemática, han aparecido cientos de libros sobre el tema. La idea inicial, como ocurre tantas veces en ciencia, no fue del propio Mandelbrot, sino de Lewis Fry Richardson (1881-1953). Entre sus artículos póstumos (1961) apareció la cuestión de medir la longitud de una frontera o de un litoral irregular. La medida depende de si recorremos la distancia con paso de

ratón o con paso de gigante. Richardson intuyó el problema y su solución. Sin embargo, como ocurre también con mucha frecuencia en ciencia, hay otras dos cosas tan importantes al menos como intuir y resolver un problema (uno): darse cuenta de su trascendencia o universalidad (dos) y convencer de ello a los demás (tres).

¿Qué es trascendencia en este caso? Trascendencia tiene que ver mucho aquí con nuestra manera de entender la inteligibilidad. Cuantos más objetos o fenómenos tengan propiedades reducibles a la fractalidad, más relevante será este concepto matemático. Y basta darse una vuelta por la realidad inerte, viva o culta para constatar que, en efecto, son muchos los pedazos de naturaleza que tienen en la fractalidad su esencia común. Mandelbrot tuvo el enorme mérito de generalizar el concepto, de darle nombre y soporte y rigor matemático, de llamar la atención sobre su alta frecuencia en la naturaleza y de seducir, como pocas veces ha ocurrido antes, a la comunidad científica. La idea de la fractalidad es una idea bella y ¡los propios fractales producen un raro placer estético!

Los fractales han llegado además en una época idónea para su desarrollo y difusión, impensable en los tiempos de Richardson. Hoy tenemos acceso a máquinas de crear fractales, máquinas de iterar patrones a placer a grandes velocidades, y todo ello con resoluciones y posibilidades gráficas prácticamente ilimitadas: los ordenadores. Mandelbrot encontró en IBM un entorno perfecto para su trabajo. No es casualidad. La práctica totalidad de los artículos y libros dedicados a los fractales se prodiga con bellas simulaciones de todo tipo. Y así como la frecuencia de una forma en objetos y fenómenos reales es una buena medida de su inteligibilidad, lo mismo puede decirse de la profusión de publicaciones sobre fractales respecto de la obra de Mandelbrot.

Hay algunos rasgos comunes, por presencia y por omisión, en la vasta literatura fractal que irrumpe en los años noventa [62-69]. Todos exhiben complejas y bellas iteraciones y todos se esfuerzan por comparar las simulaciones con objetos fractales de la realidad más variada y cotidiana. El desfile de presuntos fractales en la materia inerte, en la materia viva e incluso en la materia culta es en verdad convincente. Sin embargo, hay una curiosa omisión en todos ellos que extraña desde el esquema conceptual aquí propuesto. Para eso sirven, entre otras cosas, los esquemas conceptuales. Lo expresaré con tres preguntas:

¿Por qué son las formas fractales tan frecuentes en la realidad inerte? ¿Por qué son las formas fractales tan frecuentes en la realidad viva? ¿Por qué son las formas fractales tan frecuentes en la realidad culta?

Como apunta el filósofo inglés A.J. Ayer, existen muchas acepciones diferentes en el lenguaje común para el término «por qué», quizá tantas acepciones como acepciones tiene la palabra «causa». Sin embargo, no hay ambigüedad posible en nuestro caso. Las preguntas equivalen a preguntarse por lo que hemos llamado la selección fundamental, la selección natural y la selección cultural. Es decir, nuestro esquema conceptual nos sirve para repreguntar así: ¿qué estabilidad confiere la fractalidad a un cuerpo inerte? ¿En qué favorece la fractalidad a un individuo vivo para que éste siga vivo? ¿Cuál es el gozo mental o la función culta que impulsa a la mente a crear fractalidad?

Para decirlo aún de otra manera. La extensa e intensa bibliografía sobre las formas fractales no se interesa demasiado por lo que aquí hemos llamado la *función* (fundamental, natural y cultural) de la fractalidad en la naturaleza.

La primera parte de este libro tiene, entre otros, el objetivo de convencer al lector sobre la conveniencia de las preguntas del estilo de las que acabamos de lanzar. Pero antes de intentar unas respuestas, propongo un rápido viaje por la realidad de este mundo para, como siempre, nutrir la intuición y comprobar la anunciada perseverancia y omnipresencia de los fractales en este mundo.

¿Son en verdad tan frecuentes? Citemos, para empezar, sólo algunos casos a modo de visión panorámica. El paisaje geológico de la superficie de cualquier planeta suele ser fractal. El *estilo* característico de un paisaje particular puede caracterizarse en una primera aproximación por la correspondiente dimensión fractal, un número. Así se pueden crear, por síntesis de ordenador, paisajes que no existen en la realidad pero que son inconfundiblemente marcianos, terrestres o lunares... Lo mismo puede decirse del perfil del litoral que marca una frontera particular entre tierra firme y el océano, o de un paisaje esculpido por corrientes de agua. En muchos casos, las fracturas de materiales generan grietas fractales, y muchos procesos de agregación de partículas que se adhieren unas a otras desarrollan también formas fractales. Para

centrar la discusión, atendamos a dos casos, un fenómeno y un objeto bien frecuentes de la realidad inerte: un relámpago y un copo de nieve.

Ambas formas son fractales. En el caso de la descarga eléctrica no se observa lo que solemos llamar un orden geométrico, no hay una función matemática concreta y elegante que describa su geometría, su forma matemática (como ocurre con todas las otras formas citadas en este libro). Pero hay un estilo inconfundible, existe una dimensión fractal (un número) bien definida y bien medible. Un pedazo del rayo se parece al rayo entero. Podemos diseñar fácilmente un programa de ordenador que simule rayos parecidos a placer, rayos creíbles, rayos que se parecen a los que en condiciones similares ya se han dado y a los que aún tienen que darse. Para la exposición del museo conseguimos una buena pieza ilustrativa de este fenómeno. En los desiertos de Libia y de Egipto se encuentran concreciones minerales fractales llamadas fulguritas. Se trata de rayos que caen en la arena del desierto. La energía de la descarga funde los granos de la fina arena y el resultado es una especie de fotografía tridimensional de un rayo (figura 18.4). Un fenómeno fractal transformado en pieza fractal de museo.

Tampoco es difícil idear un artefacto generador de fractales. Para ello basta aprisionar una gota de aceite de silicona transparente entre dos vidrios planos y diseñar un dispositivo para regular la presión entre ellos. Variando la presión se puede ver crecer y decrecer, hacerse y deshacerse, un contorno fractal (figuras 18.5, 18.6 y 18.7).

El copo de nieve no es menos frecuente en la realidad. Se diferencia del rayo en que, además de fractalidad, exhibe orden. Un copo de nieve, visto al microscopio, es un objeto de una estructura ordenada y de una simetría matemática exquisita y delicada. Se trata de un cristal de hielo ramificado según una curiosa simetría séxtuple. Digamos que es un fractal exacto sobre la forma virtual de un hexágono perfecto. Podríamos muy bien haberlo citado al hablar de los hexágonos en el capítulo segundo de este libro. En cada instante caen sobre la superficie de la Tierra miles de millones de copos de nieve y, sin embargo, ¡no hay dos copos de nieve idénticos! Tienen, eso sí, un estilo común. Lo que tienen en común es su simetría hexagonal inicial y su fractalidad final.

Resulta revelador constatar que el primer científico que se interesó por la forma de los copos de nieve fue nada menos que Kepler a princi-

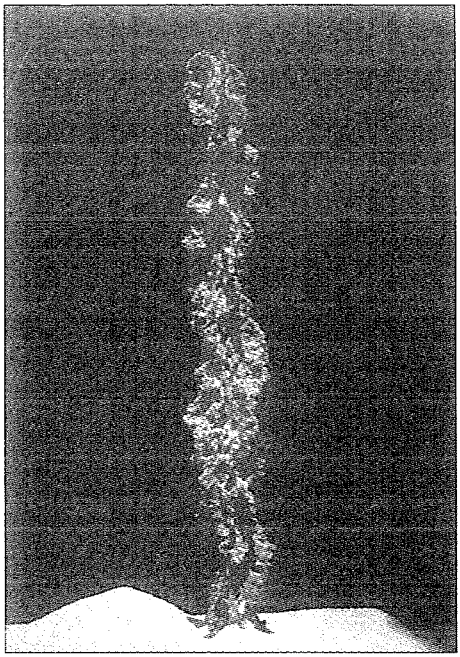


Figura 18.4. Fulgurita (Egipto). Algunos rayos caen en la arena del desierto, funden los granos de arena y se consolidan en una reproducción tridimensional de su fractalidad (fotografía del autor; colección MCFLC).

pios del siglo XVII. Revelador, en primer lugar, como ilustración de lo que significa comprender para un científico. Kepler es celebérrimo en la historia de la física por ser quien descubriera las tres leyes del movimiento planetario, es decir, la inteligibilidad planetaria, es decir, lo que, según sus observaciones, todos los movimientos planetarios tienen en común. Fue un formidable esfuerzo en pos de la inteligibilidad científica, una inteligibilidad superada después por Newton con su ley de gravitación y sus leyes generales de la mecánica (lo que extendía la compresión-compr*e*nsión a cualquier movimiento de cualquier cuerpo en situación no cuántica, no relativista). Ese espíritu de comprensión es lo que impulsa a Kepler a olfatear (primero) cualquier regularidad en la realidad, para buscar (luego) alguna clase de compresión, de patrón de pauta común. Sin embargo, en su delicioso librito *De nive sexangula* (1611) [70] intenta comprender la simetría hexagonal de los

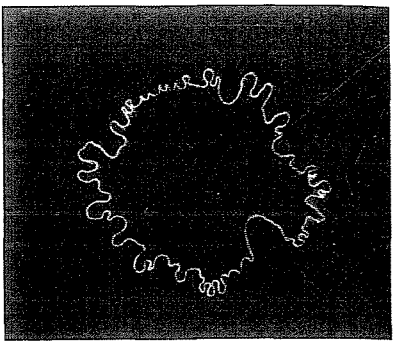


Figura 18.5. Gota de líquido viscoso fractalizando su contorno por la variación de presión entre dos vidrios paralelos. Presión baja.

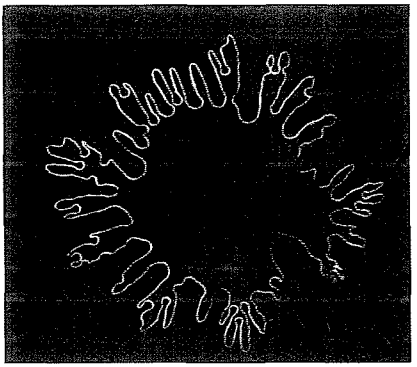


Figura 18.6. Gota de líquido viscoso fractalizando su contorno por la variación entre dos líquidos paralelos. Presión media.

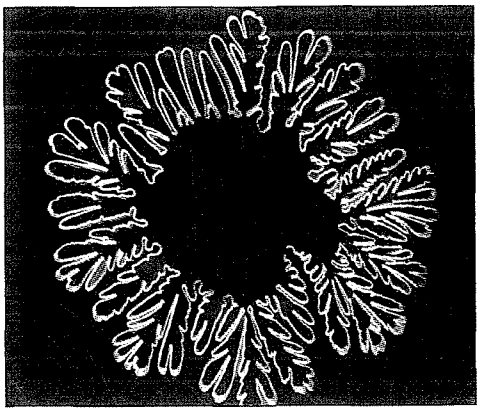


Figura 18.7. Gota de líquido viscoso fractalizando su contorno por la variación entre dos líquidos paralelos. Presión alta (fotografías del autor).

copos de nieve. El libro es en realidad un divertimento que el físico concibió como un regalo de Año Nuevo para los amigos. En él, Kepler parte de una idea simple, la misma que hemos usado aquí para un primer intento de comprender el hexágono como un gran empaquetador. Supone, como se puede suponer con toda facilidad, que un copo de nieve es básicamente un cuerpo plano y que la materia, los cristales de hielo en este caso, está constituida en último término por partículas ultramicroscópicas llamadas átomos. Como bien observa Ian Stewart [71], hasta entonces nadie había hecho nada útil, en casi dos mil años, con la antigua teoría de Demócrito. La población de discos iguales que compiten por un espacio plano, los átomos, genera el mágico número seis porque, lo hemos visto, en torno de una circunferencia caben otras seis tangentes de igual tamaño. El hexágono es el empaquetamiento más compacto, aquel que no deja espacios intersticiales desperdiciados. El matemático húngaro Fejes Toth lo demostraría cuatrocientos años después con todo el rigor que los matemáticos se exigen. La cristalografía moderna, por otra parte, también ha dado la razón (aproximada) a la intuición de Kepler a pesar de las hipótesis excesivamente simplificadas de éste. El hexágono pavimenta. No hay duda. Pero Kepler no se ocupó de la estructura fractal sobrepuesta a la simetría hexagonal. Hoy conocemos, gracias a los trabajos de John Day en los años sesenta, los mecanismos que llevan a un copo de nieve a desestabilizarse durante el crecimiento. Según sean las condiciones exteriores, el cristal incorpora nuevas moléculas de agua, luego el hexágono salta a una estrella de seis puntas, luego las puntas crecen hasta cierto tamaño hasta que saltan a otra estrella, etcétera. Day usó principios físicos (como el de mínima energía) que equivalen, en último término, a criterios de estabilidad, justamente lo que aquí hemos llamado *función fundamental*, el criterio de la selección fundamental. La incertidumbre ambiental (las fluctuaciones concretas de parámetros del entorno como la temperatura, la presión, la humedad, etcétera) acaba de explicar el hecho de que, aun siendo formas fractales, sea tan difícil encontrar dos que se parezcan en los detalles. Es un proceso caleidoscópico. La unidad que se repite es incierta, pero la globalidad conserva su exquisita simetría.

El descubrimiento de un mecanismo supone ganar inteligibilidad sobre la emergencia y la perseverancia de una forma en la naturaleza.

Sin embargo, mejorar la comprensión significa en ciencia que menos explica más. Por ejemplo, hay más inteligibilidad en las leyes de Kepler que en la descripción del movimiento de los planetas de Copérnico. Pero hay más inteligibilidad en las leyes de Newton que en las reglas de Kepler. Así se despliega y progresa la ciencia. Hoy parece que todo está maduro para dar un gran salto en la teoría de las formas. En la forma que nos ocupa ahora, muchos autores han propuesto mecanismos, o modelos de mecanismos, que describen la generación de formas fractales. Este ensayo pretende convencer de que ese salto consiste en atender a la idea de función tal como la hemos construido en nuestro esquema conceptual.

En efecto, la literatura sobre fractales puede mostrar hoy una buena colección de mecanismos capaces de generar fractales, pero quizás hayamos omitido lo más relevante, las funciones que resultan de las distintas selecciones. Porque resulta que ¡hay más mecanismos que funciones! Esto es, en muchas ocasiones varios mecanismos conducen a una sola función. Eso es lo que vamos a intentar de nuevo con los fractales.

Consideremos el mundo inerte y regresemos a la pregunta que elegimos aquí como la buena pregunta: ¿por qué son tan frecuentes los objetos fractales en el mundo inerte? ¿Se puede hablar de una estabilidad fractal? ¿Se puede demostrar algo así como una estabilidad fractal sin comprometerse con las circunstancias y los mecanismos particulares de cada caso?

Se puede. La curva de Koch es quizás el fractal matemático más simple que uno puede imaginar. Mandelbrot lo usa con frecuencia [60] para introducir el concepto mismo de fractal y aparece en todos los libros como ilustración del famoso copo de nieve. Se parte de un segmento y se definen dos números n y m. La primera iteración consiste en dividir el segmento m veces y reintroducirlo n veces entre los mismos extremos. Para la segunda iteración se hace lo mismo con todos los segmentos que han resultado de la primera iteración. Y así sucesivamente. Contémplese ahora una curva de Koch (figura 18.8) iterada tres veces con m = 3 y n = 4. En realidad sólo están presentes los pequeños segmentos que han resultado de la última iteración. Pero no hay duda de que se agrupan en figuras en las que dominan unas distancias que no son sino todos los segmentos de todas las iteraciones inter-

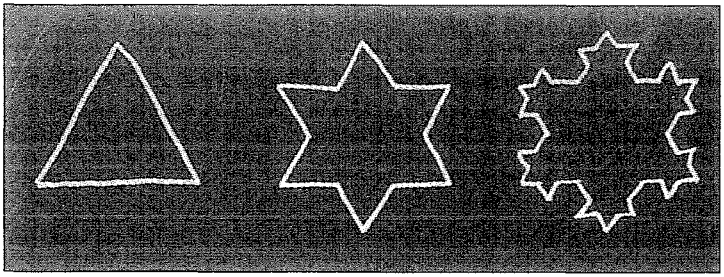


Figura 18.8. Figura de Koch, la forma más intuitiva de producir la fractalidad (dibujo del autor).

medias. En el año 1992 [72] se me ocurrió, dado que en la forma final influyen eventualmente todas las escalas intermedias recorridas, definir el concepto de entropía de la forma, una magnitud que da cuenta de la variabilidad de las distancias de todas las escalas presentes en un fractal de Koch. De aquí surgió una idea que aún tardaría unos cinco años en madurar: si una función tipo entropía da cierta medida de la variabilidad de una forma, ¿a qué situación de (relevante) estabilidad corresponde el valor máximo de la entropía de forma? El segundo principio de la termodinámica predice las configuraciones más probables y estables del equilibrio. La maximización de la entropía de Boltzman bajo las condiciones de aislamiento de un sistema supone un principio de enorme prestigio en física a la hora de determinar estas configuraciones (colectividades estadísticas). No hay excepciones a este principio. Es real lo que no contradice el principio. En los años setenta, E.T. Jaynes generalizó la idea a sistemas no necesariamente termodinámicos, con la misma idea y el mismo método (maximización de la entropía con la información disponible) [73], sólo que con otra función entropía, la entropía de C.E. Shannon. Los resultados, hemos mencionado algunos con anterioridad, fueron espectaculares en el momento de buscar la estabilidad de sistemas tan dispares como los lingüísticos o los ecológicos. Cuando nos tropezamos en la naturaleza con una forma o una estructura, no es por casualidad. Es porque tal forma o estructura tiene una probabilidad razonable de salir en la foto. Es decir, porque tiene estabilidad, la función de la selección funda-

mental por excelencia, porque es capaz de estar y de seguir estando, porque ha superado una selección que elige entre todo aquello que anuncia un principio tan potente como el de máxima entropía o mínima energía. De ahí viene la idea: ¿por qué no maximizar la *entropía de forma* para ver lo que tan prestigioso principio tiene que anunciar sobre la estabilidad de las formas en el mundo inerte?

Eso es lo que hizo uno de mis más brillantes discípulos para su tesis doctoral, Romualdo Pastor-Satorras. El resultado apareció en dos artículos publicados en la revista *Physica A* en los años 1996 y 1997 [74] y [75]. Conseguimos demostrar que la autosimilitud de una gran variedad de conjuntos fractales se deduce de un principio que maximiza la *entropía de forma* una vez determinada la información media necesaria para fijar las reglas. El análogo termodinámico es perfecto. La autosimilitud fractal es estadísticamente estable y la dimensión fractal desempeña el mismo papel que la temperatura en termodinámica. Habíamos encontrado lo que buscábamos: una pista relevante de por qué la fractalidad emerge con tanta facilidad en el mundo inerte, con independencia del mecanismo particular que lo consigue.

Ahora le toca el turno al mundo vivo. La vasta y diversa literatura de la fractalidad gusta de exhibir la fractalidad de los objetos vivos. Aparecen en la práctica totalidad de las jerarquías de la organización de la vida en el planeta. Se diría que la fractalidad es especialmente insistente por gracia de la selección natural. Se diría que en eso supera con creces a la selección fundamental. Se diría que la selección natural favorece tanto la fractalidad que casi la impone como una solución de la que incluso cuesta desviarse. Intentaré convencerles de ello.

Empecemos por las plantas. Contemplemos por ejemplo el aspecto de un almendro en diciembre, desprovisto de flores y hojas. Y contemplemos esa desnudez del ramaje contra el cielo azul (figura 18.10) para apreciar cómo el tronco central, las ramas, las ramas de las ramas —y así sucesivamente hasta alcanzar las puntas últimas— llenan el espacio disponible. La forma del ramaje es fractal. Cualquier pedazo de almendro que contenga las puntas terminales da el pego para representar la totalidad del árbol. En muchos casos, si plantamos un pedazo así, incluso acabará creciendo hasta llegar a ser un árbol adulto, un almendro de provecho con el mismo estilo inconfundible, con ese estilo que hace que un conocedor lo pueda identificar a distancia sin ver los frutos, ni

las flores, ni las hojas. En un almendro medio se pueden reconocer hasta ocho iteraciones. El ángulo de la rama secundaria con el tronco es el mismo que el que forma la rama terciaria con la secundaria... No hace falta mucha imaginación para visualizar una estructura muy similar de las raíces bajo tierra... No hay dos almendros iguales, pero todos son formas ramificadas fractales de igual dimensión fractal. Es el estilo almendro, lo que todos los almendros tienen en común. Es la inteligibilidad de su forma, su primera inteligibilidad. Pero se puede hablar de una segunda inteligibilidad porque también se puede asegurar que, en mayor o menor grado, con mayor o menor número de iteraciones reconocibles o con diferente dimensión, resulta que ¡todos los árboles son fractales! Algo debe tener la fractalidad para que la selección natural la haya favorecido tanto en el caso del concepto «árbol». Sin embargo, aún se puede pensar en una tercera inteligibilidad. En efecto, no son sólo los árboles los que se desparraman fractalmente por ramas y raíces. Basta echar un vistazo a la realidad botánica para constatar que la inmensa mayoría de las plantas (todas en general) también son fractales. Los helechos presumen de una fractalidad casi exacta (figura 18.9). Sólo con fijar la vista en ellos, la mirada se matematiza. Las Partes se parecen al Todo, donde las Partes de las Partes se parecen a las Partes del Todo, donde las Partes de las Partes de las Partes se parecen a las Partes de las Partes... En ocasiones se llega hasta siete u ocho iteraciones. O sea, una Parte del Todo, debidamente ampliada, daría el pego por el Todo, y lo mismo para las Partes de niveles jerárquicos inferiores. Desde la fractalidad perfecta y disciplinada de un helecho hasta la fractalidad seductora y creadora de un almendro, las plantas se prodigan luciendo esta forma.

No es difícil diseñar modelos que simulen las diferentes familias de fractales que emergen y perseveran en el reino verde. No es difícil comprender la iteración de reglas —diferentes pero sencillas— que siguen las plantas durante su crecimiento para lograr su particular fractalidad. Pero lo que nos interesa ahora es descubrir qué es lo que la selección natural bendice cuando favorece una forma fractal. Buscamos una pista que nos lleve a la función natural de los fractales.

Tomemos impulso. Si la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, la parábola emite y recibe, la onda desplaza, la punta penetra, la catenaria aguanta, ¿cuál es entonces la

mental por excelencia, porque es capaz de estar y de seguir estando, porque ha superado una selección que elige entre todo aquello que anuncia un principio tan potente como el de máxima entropía o mínima energía. De ahí viene la idea: ¿por qué no maximizar la *entropía de forma* para ver lo que tan prestigioso principio tiene que anunciar sobre la estabilidad de las formas en el mundo inerte?

Eso es lo que hizo uno de mis más brillantes discípulos para su tesis doctoral, Romualdo Pastor-Satorras. El resultado apareció en dos artículos publicados en la revista *Physica A* en los años 1996 y 1997 [74] y [75]. Conseguimos demostrar que la autosimilitud de una gran variedad de conjuntos fractales se deduce de un principio que maximiza la *entropía de forma* una vez determinada la información media necesaria para fijar las reglas. El análogo termodinámico es perfecto. La autosimilitud fractal es estadísticamente estable y la dimensión fractal desempeña el mismo papel que la temperatura en termodinámica. Habíamos encontrado lo que buscábamos: una pista relevante de por qué la fractalidad emerge con tanta facilidad en el mundo inerte, con independencia del mecanismo particular que lo consigue.

Ahora le toca el turno al mundo vivo. La vasta y diversa literatura de la fractalidad gusta de exhibir la fractalidad de los objetos vivos. Aparecen en la práctica totalidad de las jerarquías de la organización de la vida en el planeta. Se diría que la fractalidad es especialmente insistente por gracia de la selección natural. Se diría que en eso supera con creces a la selección fundamental. Se diría que la selección natural favorece tanto la fractalidad que casi la impone como una solución de la que incluso cuesta desviarse. Intentaré convencerles de ello.

Empecemos por las plantas. Contemplemos por ejemplo el aspecto de un almendro en diciembre, desprovisto de flores y hojas. Y contemplemos esa desnudez del ramaje contra el cielo azul (figura 18.10) para apreciar cómo el tronco central, las ramas, las ramas de las ramas —y así sucesivamente hasta alcanzar las puntas últimas— llenan el espacio disponible. La forma del ramaje es fractal. Cualquier pedazo de almendro que contenga las puntas terminales da el pego para representar la totalidad del árbol. En muchos casos, si plantamos un pedazo así, incluso acabará creciendo hasta llegar a ser un árbol adulto, un almendro de provecho con el mismo estilo inconfundible, con ese estilo que hace que un conocedor lo pueda identificar a distancia sin ver los frutos, ni

las flores, ni las hojas. En un almendro medio se pueden reconocer hasta ocho iteraciones. El ángulo de la rama secundaria con el tronco es el mismo que el que forma la rama terciaria con la secundaria... No hace falta mucha imaginación para visualizar una estructura muy similar de las raíces bajo tierra... No hay dos almendros iguales, pero todos son formas ramificadas fractales de igual dimensión fractal. Es el estilo almendro, lo que todos los almendros tienen en común. Es la inteligibilidad de su forma, su primera inteligibilidad. Pero se puede hablar de una segunda inteligibilidad porque también se puede asegurar que, en mayor o menor grado, con mayor o menor número de iteraciones reconocibles o con diferente dimensión, resulta que ¡todos los árboles son fractales! Algo debe tener la fractalidad para que la selección natural la haya favorecido tanto en el caso del concepto «árbol». Sin embargo, aún se puede pensar en una tercera inteligibilidad. En efecto, no son sólo los árboles los que se desparraman fractalmente por ramas y raíces. Basta echar un vistazo a la realidad botánica para constatar que la inmensa mayoría de las plantas (todas en general) también son fractales. Los helechos presumen de una fractalidad casi exacta (figura 18.9). Sólo con fijar la vista en ellos, la mirada se matematiza. Las Partes se parecen al Todo, donde las Partes de las Partes se parecen a las Partes del Todo, donde las Partes de las Partes de las Partes se parecen a las Partes de las Partes... En ocasiones se llega hasta siete u ocho iteraciones. O sea, una Parte del Todo, debidamente ampliada, daría el pego por el Todo, y lo mismo para las Partes de niveles jerárquicos inferiores. Desde la fractalidad perfecta y disciplinada de un helecho hasta la fractalidad seductora y creadora de un almendro, las plantas se prodigan luciendo esta forma.

No es difícil diseñar modelos que simulen las diferentes familias de fractales que emergen y perseveran en el reino verde. No es difícil comprender la iteración de reglas —diferentes pero sencillas— que siguen las plantas durante su crecimiento para lograr su particular fractalidad. Pero lo que nos interesa ahora es descubrir qué es lo que la selección natural bendice cuando favorece una forma fractal. Buscamos una pista que nos lleve a la función natural de los fractales.

Tomemos impulso. Si la esfera protege, el hexágono pavimenta, la espiral empaqueta, la hélice agarra, la parábola emite y recibe, la onda desplaza, la punta penetra, la catenaria aguanta, ¿cuál es entonces la

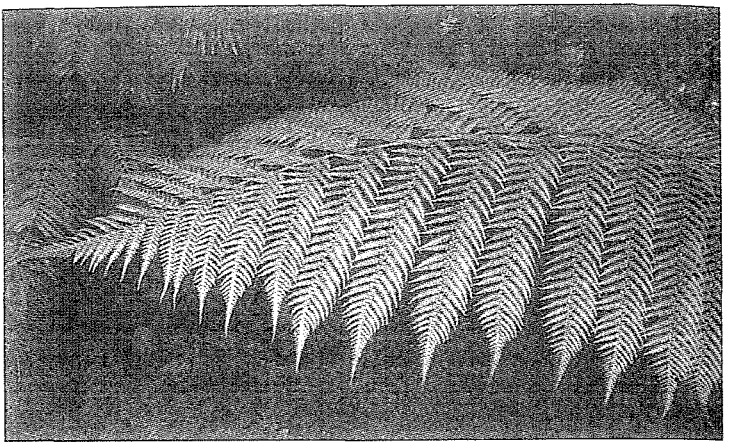


Figura 18.9. Los helechos son los fractales más perfectos por selección natural. Todos los helechos son fractales. El todo tiene partes que se le parecen, cuyas partes se parecen a sus partes... (fotografía del autor).

función natural prioritaria de los fractales? O por lo menos, ¿cuál es la función fractal en el caso de las plantas?

Lo que vertemos aquí (me alivia disculparme de vez en cuando) no es el riguroso resultado de una investigación extensa e intensa. Para tal cosa existen otro tipo de recursos y otro tipo de publicaciones. Aquí se trata de airear unas cuantas ideas y sugerencias, aunque al final todo quede en otra manera de preguntar. Y ahora que la pregunta ya está sobre la mesa, ahí va una respuesta. La fractalidad, prioritariamente, coloniza. Es una manera de llenar el espacio, es una manera de crecer... Pero coloniza, llena y crece manteniendo cierta continuidad entre las diferentes partes, una continuidad por donde puede circular un líquido como la savia o la sangre o un gas como el aire. ¿Hay alguna ventaja común a todos los objetos fractales en las plantas, alguna ventaja que las ayude a seguir con vida cuando la incertidumbre aprieta?

Comparemos la esfera con las formas fractales. En algunos aspectos incluso se puede decir que son lo contrario. Si hablamos de la forma de la superficie que separa el interior del exterior de un individuo vivo, la oposición es clara. La esfera minimiza la superficie fron-

tera que contiene un volumen determinado. La fractalidad más bien la maximiza. Y cuanto más itera la forma fractal, más crece la superficie-frontera-con-el-exterior con relación al volumen-encerrado-en-el-interior. Muchos árboles y cactos presentan incluso una duda esquizofrénica entre la esfera y los fractales. En efecto, muchos son los árboles cuyo ramaje recuerda, visto desde lejos, a una esfera o un disco. La tendencia es fuerte. Es muy frecuente que cuando dos o más árboles crecen demasiado juntos, se repartan sus diferentes contribuciones para que la copa tenga una sola redondez. La simetría esférica protege, de acuerdo. Pero visto de cerca, ¡el ramaje penetra el aire fractalmente! A gran escala, el árbol está protegido por una simetría circular. Y a menor escala, a la escala en la que se intercambian gases, agua, nutrientes, calor, etcétera, el árbol es fractal. Nos acercamos a una posible respuesta. La tendencia a aumentar el valor de la superficie que separa el interior del exterior favorece el intercambio de materiales entre el dentro y el fuera de la planta. Captar la humedad ambiente es una cuestión general. Otra es captar la luz. La fractalidad de las plantas rellena el espacio visitando el máximo número de puntos del entorno y además lo hace con continuidad, es decir, de manera que el interior del individuo no pierde la conectividad interior. La fractalidad intima el espacio. He aquí una buena función para ayudar a que una planta siga viva.

¿Y los animales? ¿Por qué no son también fractales las formas de los animales? También son seres vivos, también necesitan intercambiar materia, energía e información con el exterior... Buena pregunta. Mejor dicho, mala pregunta. A primera vista, se diría que los animales no exhiben formas fractales. Si un ser humano fuese fractal en su forma exterior, quizá le salieran cinco deditos de cada dedo de la mano. Y cinco deditos aún más pequeños para cada uno de aquéllos, hasta quizá seis o siete iteraciones, como ocurre con el almendro. No es así. ¿Pero servirían para algo tales fractales? Un animal intercambia energía y materiales de una manera muy distinta. Para empezar, dispone de orificios a través de los cuales concentra el intercambio de sólidos y líquidos con el exterior. El problema del calor incluso invierte los intereses. Los animales en general intentan aislarse del entorno con pieles o arquitecturas especiales, o adoptando formas esféricas (acurrucarse). En otras palabras, en el reino animal no supone ninguna ventaja maximizar la conexión interior con la exterior. Los animales no necesitan intimar

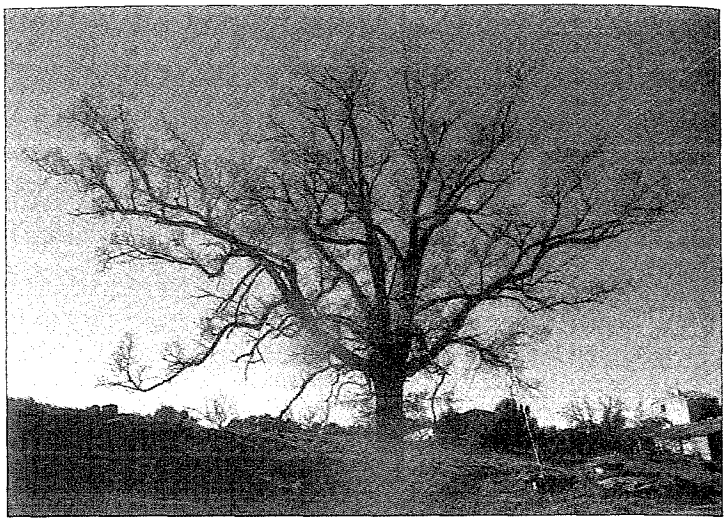


Figura 18.10. Almendro en invierno. Todos los almendros son fractales. Y todos los árboles. Quizá todas las plantas... ¿Y los animales? (fotografía del autor).

el espacio exterior como lo hacen las plantas (quizás en el caso de la mano aumentaría la sensibilidad del tacto). Por eso los animales, en general, no son fractales por fuera. Lo son algunos invertebrados marinos, como algunas medusas y estrellas (véase la figura inicial de este capítulo, 18.1). No, en general los animales no son fractales en su aspecto exterior. Sí, pero...

¡Por dentro, los animales son fractales! Basta pensar en el sistema circulatorio, en el sistema nervioso o en los bronquios de cualquier vertebrado (figura 18.11). Compárese, mental y alternativamente, el almendro de ramas desnudas con el sistema circulatorio humano. Somos un almendro por dentro. Las plantas son fractales por fuera. Los animales son fractales por dentro. Y lo más importante: lo que tenían en común todos los almendros, todos los árboles y todas las plantas, por fuera, lo comparten los animales por dentro. La fractalidad también intima el espacio en los animales, sólo que se trata del espacio interior, donde estos objetos vivos tienen la necesidad de suministrar toda clase

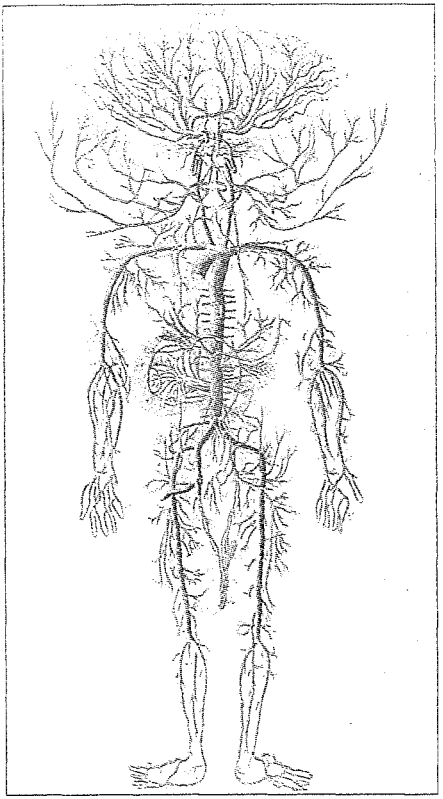


Figura 18.11. Sistema circulatorio según la Enciclopedia de Diderot y D'Alambert. Las plantas son fractales por fuera. Los animales lo son por dentro.

de sustancias, energía e información a cada una de sus células. De hecho, basta fijarse en el sistema vascular de una hoja para encontrarse con una fractalidad muy parecida a la de un animal. Parece haber una inteligibilidad suplementaria en la nervura dedicada al transporte interior en animales y plantas. Es decir, en el mundo inerte los fractales representan sólo una manera estable de crecer; en el mundo vivo representan una manera ventajosa de llenar el espacio; pero todo indica que la nervura fractal dedicada al transporte interior de materia (el sistema nervioso se saldría en principio de este caso) tiene una función natural suplementaria. Se diría que la selección natural favorece una subfun-

ción importante de la colonización del espacio interior y que tal subfunción permite comprender la universalidad de los fractales en el mundo vivo...

Hemos comentado en varias ocasiones que un individuo vivo intercambia materia, energía e información con su exterior. Lo que no hemos comentado tanto es lo que ocurre en el interior del individuo. Un ser vivo es ante todo un objeto extenso. Tiene volumen. Y ese volumen necesita de cierto mantenimiento para seguir vivo. En general, hay que transportar energía, materia e información hasta cada punto de ese interior (digamos que, en biología de individuos pluricelulares, un punto significa otro individuo de una jerarquía inferior, la célula). La cuestión no puede ser más general. Afecta por ejemplo a la estructura y a las propiedades funcionales de los sistemas cardiovasculares y respiratorios de todos los vertebrados y a los sistemas vasculares de todas las plantas. Todos estos casos (y algunos más, como el sistema de tubos de las tráqueas de los insectos) tienen como mínimo tres propiedades en común:

1.ª La estructura ramificada fractal que alimenta los puntos del interior del organismo.

2.ª El calibre límite de los últimos conductos, los más finos, los que vierten su contenido en el punto de destino.

3.ª Una misteriosa ley de escala: el ritmo metabólico de un individuo vivo, medido por ejemplo por el calor producido por unidad de masa, es proporcional al valor de la masa del individuo elevado a la potencia 3/4.

Las tres propiedades son el resultado de observaciones en un colosal número de casos diferentes de la realidad viva. Sin embargo, no nos resultan igualmente comprensibles a primera vista. La primera propiedad sin duda lo es. Basta mirar. La forma fractal es una buena manera de colonizar el espacio. Además, la colonización es continua y conexa, lo que va muy bien si de lo que se trata es de transportar sangre o savia. Y nada más cómodo que una iteración fractal para construir la frondosidad más compleja y conveniente con la instrucción más sencilla. La selección natural no debió de tener muchas dudas para *dejar pasar* una ganga como ésta. Ya tenemos una primera función natural que contribuye a la inteligibilidad de estos fractales: servir a los puntos del espacio interior.

La segunda propiedad también es evidente. Sólo hay que ayudarse con algún instrumento para medir el calibre límite de los capilares más diminutos. El límite es el mismo en todos los casos. Quizá sorprenda que los capilares de una ballena de cien toneladas no sean mayores que los de un ratoncito de unos pocos gramos. Pero un animal grande no es una homotecia simple de uno pequeño. Se comprende, el límite está impuesto por la fenomenología física de la tensión superficial, el flujo hidrodinámico, la viscosidad, etcétera. Un capilar deja de funcionar como tal, tanto si es demasiado grande como si es demasiado pequeño. Esta segunda propiedad supone una restricción a la primera propiedad. Es un imperativo de la física y de las constantes de la naturaleza. La iteración fractal no puede prolongarse indefinidamente.

La tercera propiedad no tiene nada de evidente. Ahora se trata de hacer precisas y pacientes medidas en experimentos que involucran instrumentos complejos y sensibles (como los calorímetros o medidores de consumo de oxígeno). De hecho, las observaciones de las primeras reglas de escala del factor 1/4 datan de los años treinta del siglo pasado. Las medidas sobre el ritmo metabólico se deben a Max Kleiber [76], y se refieren a todo el amplísimo espectro de tamaños individuales en el mundo vivo, desde una bacteria a una ballena azul (¡veintiún órdenes de magnitud!). La observación no es trivial, y no es fácil de comprender. Más aún, ha sido un gran misterio durante más de medio siglo. Desde entonces el misterio no había hecho sino aumentar. Primero, porque todas las explicaciones que se iban proponiendo acababan siempre por desmontarse. Segundo, porque cada vez se encuentran más propiedades biológicas que siguen este tipo de leyes con factores de escala «mágicos» múltiplos de 1/4. Los naturalistas están bien familiarizados con este comportamiento. Los animales grandes son más longevos, crecen más lentamente, su corazón late más despacio... El misterio no está en la existencia de un factor de escala, sino en que tal factor sea un múltiplo de 1/4 y no un múltiplo de 1/3.

Por ejemplo, el calor se produce en todos los puntos del interior de un volumen de tres dimensiones. Sin embargo, para salir al exterior, el calor generado en el interior pasa por todos los puntos de la superficie de dos dimensiones que encierra tal volumen. Luego cualquier cantidad que tenga que ver con la producción interior se relaciona con cualquier cantidad que tenga que ver con la disipación según una po-

tencia de 2/3. La realidad es terca en sus respuestas y durante los últimos cincuenta años ya se han acumulado más de doscientas variables biológicas que siguen las leyes de escala del 1/4 y no del esperado 2/3. Misterio, décadas y décadas con un precioso y mortificante misterio sin resolver.

La razón de tanto despiste está, hoy lo sabemos, en un prejuicio: el enfoque euclídeo del problema. En estos organismos vivos el espacio tridimensional no se llena de cualquier manera. La hipótesis errónea es suponer que el calor (o cualquier otra magnitud extensiva) se genera homogéneamente en el interior. Por decisión de la selección natural, el espacio se llena fractalmente. Con esta nueva idea se puede recalcular el factor de escala previsible. Éste es el primer mérito de dos biólogos de la Universidad de Nuevo México en Alburquerque, James H. Brown y Brian J. Enquist, y del físico teórico Geofrey West del Los Álamos National Laboratory, también de Nuevo México. Los biólogos, iluminados por la lectura del libro de Mandelbrot, tuvieron la sospecha de que la clave del misterio está en el transporte interno de nutrientes y otras sustancias vitales, a través de la red fractal de conductos. Hay que abandonar la geometría euclídea y adoptar una mentalidad fractal de la ocupación del espacio. Para ello conviene la ayuda de alguien con un perfil bien especial: debe ser un físico o matemático que trabaje a tiro de piedra, que tenga tiempo para perder, que sienta curiosidad por temas ajenos y que tenga buena mano para resolver problemas complejos de hidrodinámica. Con todo ello existe la esperanza de una nueva comprensión. La situación es la siguiente.

Las tres propiedades antes mencionadas resultan de observar la realidad. Dos se comprenden y una no. La cuestión está en si se puede lograr una compresión de las tres. Por ejemplo: ¿se puede deducir la propiedad incomprensible a partir de las otras dos propiedades comprensibles? West, Brown y Enquist (WBE) lo lograron y publicaron su trabajo en un maravilloso artículo del año 1997 en la revista *Science* [77]. Sin embargo, para resolver el antiguo misterio, introdujeron una cuarta propiedad en su modelo. Es la siguiente, la propiedad número cuatro.

4.ª: La energía requerida para distribuir el transporte de recursos por el interior del sistema es mínima.

Se trata de una nueva restricción a la fractalidad que equivale, físicamente, a minimizar la resistencia hidrodinámica global del trans-

porte doméstico. Pero atención, la llamada cuarta propiedad no se deduce de los datos reales como las otras. Es una hipótesis, una conjetura, curiosamente una conjetura similar (y que se introduce con una técnica matemática similar) a la que nosotros utilizamos para demostrar la estabilidad general de los fractales en la naturaleza inerte. El resultado de WBE se puede leer así:

El enigma de las leyes de escala de factor 1/4, es una consecuencia de la ramificación fractal cuando el transporte interior minimiza su consumo de energía.

Nada que objetar. Sin embargo, yo prefiero leer este mismo brillante resultado de otra manera, que encaja mejor con el esquema conceptual de este ensayo. WBE establecen la relación necesaria entre cuatro propiedades. Tres de ellas se derivan directamente de la observación de la realidad, la cuarta es una conjetura. La conjetura es la pieza que hace que todo encaje. Todo era conocido excepto la conjetura. Luego la conjetura funciona. La conjetura es lo que ganamos. La conjetura proporciona nueva comprensión. La conjetura se añade a la lista de las cosas que tienen en común todos estos casos reales (ramificaciones fractales que cumplen las reglas de escala del 1/4). La conjetura pasa a formar parte de la nueva inteligibilidad. Lo que en realidad hemos averiguado es que la vascularización fractal en animales y plantas minimiza la energía.

Creo que tenemos lo que buscamos. Acabamos de localizar otra función natural de la fractalidad. La selección natural actúa seleccionando fractales. La función de ayudar a seguir vivo supone diferentes subfunciones naturales. Una de ellas es, sencillamente, la colonización del espacio interior. Lo mismo vale también para una red de neuronas (figura 18.12) y quizá, en general, para todo el sistema nervioso. Pero acabamos de tropezarnos con una segunda subfunción natural de la fractalidad, que es la de minimizar la energía del transporte (lo que de momento no se ha demostrado para el sistema nervioso). Y esta función es tan general como lo son las reglas de escala con factores múltiplos de 1/4.

Resumiendo desde una perspectiva más general: de la misma manera que la selección fundamental favorece la perseverancia de los sis-

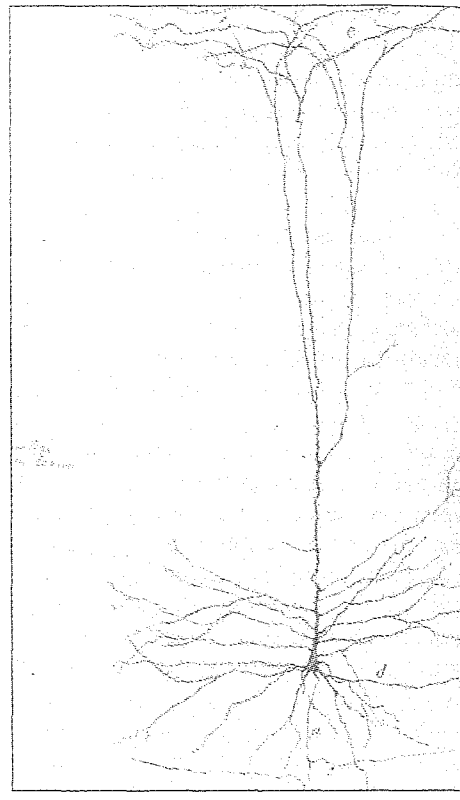


Figura 18.12. Neurona dibujada por el genial científico y dibujante Santiago Ramón y Cajal. El complejo sistema neuronal que sostiene nuestra inteligencia y nuestra memoria es una red fractal.

temas estables en el mundo inerte, la selección natural favorece la perseverancia de los sistemas que mejor se independizan de la incertidumbre ambiental. Una primera actuación de la selección natural favorece la simple ramificación fractal (lo que incluiría otros casos como el sistema nervioso). Pero minimizar el esfuerzo físico o el gasto de energía supone una ventaja más en cuanto a una eventual independencia de una entidad viva respecto de su entorno. Para seguir vivo no basta con ser estable en el sentido de la realidad inerte. La función natural de la fractalidad (la plusvalía obtenida por superar la selección natural) en el transporte interno es un buen ejemplo: cumplir con el suministro de

sustancias vitales a todas las células interiores del individuo con el mínimo esfuerzo posible. Y las reglas de escala de factor $^1/_4$ en la amplia jerarquía biológica es una (ahora) muy visible expresión del trabajo de la selección natural. Los fractales, prioritariamente, colonizan el espacio. Y si se trata del espacio interior de animales y plantas se puede decir algo más: los fractales colonizan su espacio interior para mantener vivos todos los puntos con el mínimo esfuerzo.

Sólo nos queda comentar algo de la fractalidad cultural. Ésta empieza bastante antes de la formalización y aconcepción de Mandelbrot. Contemplar una forma fractal interesa. Se experimenta gozo mental. Gozo mental, el estímulo de la selección cultural. El cerebro goza cuando ejerce como tal, cuando tiene una inteligibilidad que resolver, cuando intuye que está en situación de comprender algo. Por ejemplo, la contemplación de la estructura de venas, venitas, vasos y capilares que alimentan el riñón interesa más que la contemplación de una línea recta como las que se pintan en medio de las carreteras. Pero también interesa más que la contemplación de un ovillo de lana desenrollado y enmarañado en una masa caótica. En el primer caso no hay nada que resolver porque el problema es trivial, está resuelto de un plumazo, la representación más compacta es la propia recta. Es incomprensible por irreducible. Pero lo mismo pasa en el segundo caso. Tampoco hay nada que resolver porque la representación más compacta coincide con el lío caótico de lana. En términos arquitectónicos, el gozo visual está dentro de un intervalo, entre un mínimo de la fractalidad (quizá tipo Mies van der Rohe) y un máximo (quizá tipo Gaudí).

Pero no todo el gozo fractal accede al cerebro por la vista. De la misma manera que el espacio se ocupa con materia, el tiempo se puede ocupar con sonido. Eso es la música: *una manera autoafín de llenar el tiempo con sonido*... es cuando una breve frase, o un leve acento, es capaz de reflejar la globalidad. Es el gozo de la música: resolver la autoafinidad; un tenso conflicto entre lo que se puede predecir y la sorpresa. Si la correlación en el tiempo es demasiado baja, la predicción requiere un trabajo infinito, por lo que el cerebro se ve insuficiente y se deprime... El ruido blanco (totalmente aleatorio) primero desespera y luego aburre. Si la correlación es demasiado alta, la predicción requiere un trabajo nulo, con lo que el cerebro se ve innecesario y se ofende... El ruido marrón (una sinfonía de una sola nota) primero

aburre y luego desespera. La música es un ruido rosa. Se puede definir la dimensión fractal de la melodía (las frecuencias de las notas), de la modulación (sus intensidades) o del ritmo (sus duraciones) de una partitura. Pues bien, el margen para el gozo musical resulta ser muy estrecho, mucho más estrecho que para el visual. Las fractalidades de todas las músicas de todos los tiempos y culturas, desde el *Ba-Benzele* de los pigmeos hasta el *Sergeant Pepper* de los Beatles, pasando por la música tradicional japonesa, las ragas de la India, las canciones populares de la vieja Rusia, el jazz, la música medieval, Bach, Beethoven o Satie se apretujan en torno a un mismo valor. Algunas obras de John Cage o Karlheinz Stockhausen quedan fuera (¡!).

Salvador Dalí fue un artista que interesó a escritores, pero no sólo a escritores como ocurriera quizá con Edward Hopper, un pintor que ha maravillado a escritores, pero nunca ha emocionado a otros pintores (es, seguramente el pintor más usado en cubiertas de novelas). Sus cuadros son soledades humanas, a veces incluso soledades inhumanas, a menudo hasta soledades colectivas, es literatura pintada... Dalí interesó a científicos, pero no sólo a científicos como ocurriera quizá con Maurits Cornelius Escher, un ilustrador que enamora a científicos (es, sin duda, el artista más utilizado a la hora de ilustrar artículos y cubiertas de libros científicos) pero que deja fríos a escritores y artistas. Sus trucos distorsionan la realidad para que el científico pueda intuir lo que ya comprende... Y Dalí interesó también a otros artistas. Pero no hay duda de que la intuición de Dalí se alimentaba de ciencia, tenía amigos de ciencia, oía y leía ciencia, conversaba sobre ciencia... Yo diría que necesitaba su ración diaria de ciencia para vivir. Lo conocí al final de su vida, en 1985, con ocasión de una inolvidable reunión entre filósofos y científicos que tuvo lugar en el Teatro Museo Dalí de Figueres [4]. En total hablé con él cuatro veces antes y durante la preparación del encuentro. Siempre sobre ciencia. En una de estas ocasiones, me pidió información sobre la oxidación de la superficie del mercurio con el aire. Ante mi sorpresa, me pidió que bajara a la sala y contemplara el cuadro *La panera* y fijara mi atención en la textura de la costra del trozo de pan que aparece en la cesta... Cumplí su deseo, pero debo reconocer que no fue tanto para satisfacer su curiosidad, como para satisfacer la mía sobre la suya. Su obra transpira ciencia por todos los poros, desde la mera curiosidad técnica, como la eterna obsesión por

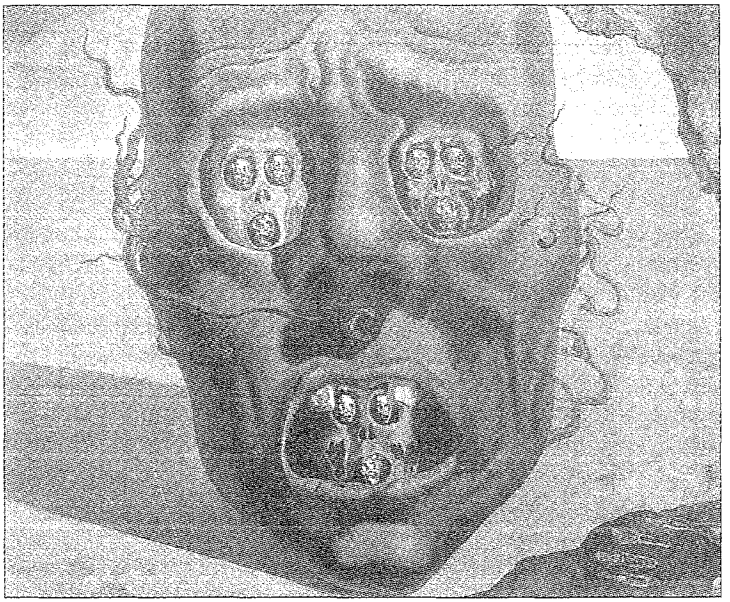


Figura 18.13. Visage de la guerre (1940-1941), de Salvador Dalí. Dalí intuyó la autosimilitud por iteración en niveles jerárquicos progresivamente decrecientes unos treinta años antes de que Benoît Mandelbrot acuñara el concepto de la geometría fractal de la naturaleza.

plasmar la tercera dimensión, a profundas intuiciones científicas de artista, como la teoría de la relatividad, la biología molecular o la física cuántica. Tuvo, creo, dos profundas intuiciones científicas de artista relacionadas con la visualización de las dimensiones en el espacio. Una se refiere a la intuición de la cuarta dimensión (atención: la cuarta, no la tercera), la otra se refiere a lo que, mucho después, Mandelbrot relacionaría con la dimensión fraccionaria, es decir, con lo que nos ocupa en este capítulo, la fractalidad. En ambas ocasiones se adelantó decenas de años a su momento natural de que la popularizaran dentro de la comunidad científica. Dejamos el caso de la percepción de la cuarta dimensión para el epílogo. De momento basta con contemplar su óleo *Visage de guerre* (Rotterdam, Museum Boymans van Beuningen, figura 18.13).

En 1940 Dalí intuye el mecanismo más simple para crear complejidad, la iteración indefinida de un patrón para llenar el espacio (en este caso hacia el interior del objeto). El más frecuente en la naturaleza para colonizar con continuidad. Cada cráneo se llena con tres cráneos que se llenan con tres cráneos que... Una iteración fractal por selección cultural.

En suma, los fractales colonizan íntima y delicadamente el espacio. La selección fundamental tiene donde elegir porque son muchos los mecanismos distintos que acaban fabricando estas formas. Los fractales inertes son estables y así lo garantiza un principio general. Los fractales vivos son ampliamente adaptativos con importantes subfunciones de eficacia. Y los fractales cultos son creativos y generan buenos estímulos para la mente a través de diferentes vías del sensorio. Eso, y no otra cosa, es empezar a comprender los fractales.

Epílogo de la segunda parte
Lo bello y lo inteligible

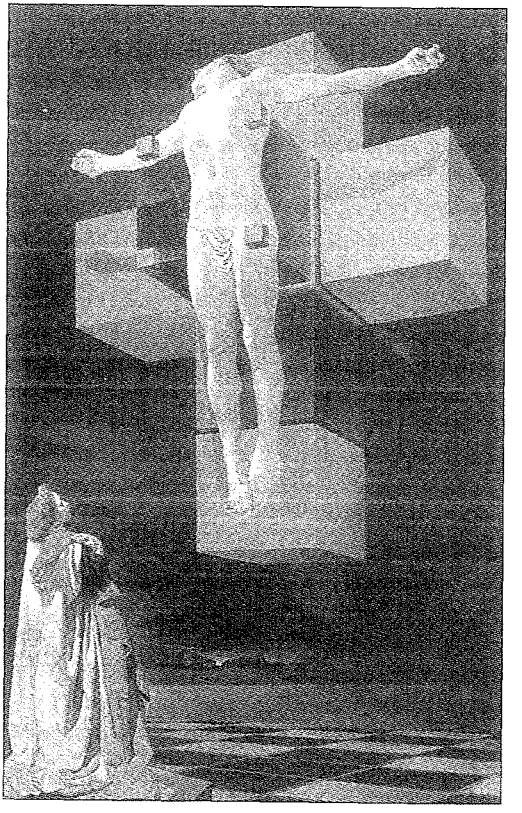


Figura 19.1. Corpus hypercubus (Crucifixión), 1954, de Salvador Dalí, Metropolitan Museum of Art.

Tal como sospechábamos, las formas de la naturaleza se pueden comprender. Alguna inteligibilidad hemos encontrado. La mente se nutre de conocimiento, pero el conocimiento no se nutre sólo de inteligibilidad. Hay otras cosas. Por ejemplo, belleza. Más aún, la creatividad humana necesita comprender para anticipar la incertidumbre. Y así se explican muchas de las formas inventadas por los seres humanos a lo largo de su historia. Pero la selección cultural no siempre trabaja en pos de la utilidad. ¿En pos de qué, entonces? Por ejemplo, de la belleza. Hemos hablado mucho de inteligibilidad y poco de belleza. Tratemos de enmendar las cosas en este epílogo.

¿Qué es la belleza? Inteligibilidad y belleza son conceptos más próximos de lo que parece a primera vista. La belleza es un estado de la mente al que se accede por un estímulo visual. Por extensión, la belleza también puede entrar a través de cualquier otro sentido. Parte de la belleza está en la realidad que percibimos y parte en nuestra propia mente. Con la inteligibilidad ocurre algo muy similar. La inteligibilidad es un estado mental al que se accede por reflexión, cuando se descubre lo común entre lo diverso. En ambos casos se trata del resultado de una actividad mental que empieza en la realidad exterior. Sin embargo, existe, creo, una diferencia.

La inteligibilidad de un pedazo de realidad se refiere a su relación con el resto de la realidad. La belleza de un pedazo de realidad, en cambio, tiene que ver con la relación entre las partes del pedazo de realidad en cuestión. La inteligibilidad es un concepto fronteras afuera; la belleza, fronteras adentro. La inteligibilidad del concepto «árbol» está en todo aquello que comparten todos los árboles; la inteligibilidad del concepto «pino» hay que buscarla en aquello que es común a todos los pinos...

La inteligibilidad crece cuando crece la intersección de las poblaciones de objetos, es decir, cuando aumenta la esencia compartida por todos. La inteligibilidad es, de hecho, *la mínima expresión de lo máximo compartido*. En otras palabras, buscar inteligibilidad es buscar algo que se repite en una variedad de pedazos de realidad, y cuando decimos que comprendemos cualquiera de tales pedazos (en lo comprendido, en lo repetido) es siempre respecto de los demás pedazos. La repetición de las cosas tiene un nombre... o dos.

La repetición en el espacio es la armonía. La repetición en el tiempo es el ritmo. Ya tenemos una primera pista, porque el tiempo y el espacio

son los conceptos a priori con los que construimos todo conocimiento inteligible. Por otro lado, ritmo y armonía son también, por su presencia o su ausencia, los conceptos esenciales de la belleza. Aventuramos una definición:

La belleza de un pedazo de realidad es el grado de ritmo y armonía que una mente es capaz de percibir.

O sea, belleza es el grado de repetición que puede percibirse entre las partes de un pedazo de realidad cuando se recorre en el espacio o en el tiempo. La belleza más simple e inmediata quizá sea la simetría, cuando un lado de un objeto, por ejemplo, se parece a otro de sus lados. Entonces, porque tal simetría existe, porque existe mucha, porque existe poca o porque deja de existir, la mente percibe belleza. La simetría es una referencia de belleza. Si percibir la inteligibilidad es comprender, ahora hay que acordar una palabra para nombrar lo que significa percibir la belleza. Debe ser una palabra que, en su significado, no incluya el gozo mental que pueda resultar de percibir lo bello, de la misma manera que el significado de la palabra comprensión no incluye el gozo que resulta de comprender. ¿Cómo llamar al simple hecho de captar una armonía o un ritmo?

La palabra no existe porque, en el lenguaje común, la belleza no se libra de una connotación positiva (que nosotros hemos evitado en la definición). Lo bello no se separa del gozo por lo bello. Por esa razón no nos sirve la palabra «embelesar». Usando dos palabras, lo que buscamos es algo así como comprender la belleza, captar la estética. Lo primero equivale a adelantar una teoría. Lo segundo es sencillamente feo. Además, son dos palabras y buscamos una sola. Inventar una palabra siempre parece presuntuoso, pero la necesitamos. Probemos. «Bellar», de bello, no funciona. Pero «beldar», de «beldad», quizá sí. «Beldad» es sinónimo de belleza, aunque con un poco más de carga femenina. Bienvenida sea esa carga. Además, y al igual que ha ocurrido en el tercer capítulo de la primera parte con la palabra «nervura», la palabra existe, aunque con otro sentido. En este caso, el segundo sentido de la palabra beldar (el único que existe de momento) nos va aquí de perlas, porque beldar es usar el bieldo, es decir, aventar las mieses, esto es, separar el grano de la paja. Propongo, pues, que beldar aluda a

la acción de separar lo que es armonía y ritmo de lo que no lo es. El paralelismo con los términos «inteligibilidad» y «comprensión» es satisfactorio, porque comprender también significa separar, separar lo compresible de lo incompresible, lo común de lo diverso, la esencia de los matices, el ruido de la información... el grano de la paja. Sí, por segunda y última vez en este ensayo, y con el debido respeto, propongo a la Real Academia:

«**beldar** (de beldad). tr. 1 Captar la belleza. 2 (de bieldo) Usar el bieldo. Separar el grano de la paja. 3 fig. Separar la información del ruido, separar lo que es ritmo y armonía de lo que no lo es».

Así, podríamos decir, por ejemplo:

«Es preferible beldar un árbol de hoja caduca en invierno, cuando se puede apreciar bien el ángulo de incidencia de una rama en la otra, de las primarias con el tronco, de las secundarias con las primarias, de las terciarias con las secundarias, cuando vemos cómo desciende el calibre de una rama según sea ésta primaria, secundaria o terciaria... Beldar en primavera es más fácil, basta apreciar la repetición de flores u hojas iguales...».

O también:

«Hacia el final del primer tiempo del quinto *Concierto de Brandeburgo,* de Juan Sebastián Bach, el clavecín parece perderse en un laberinto. Resulta conmovedor beldar sus divagaciones por una maraña de falsas soluciones hasta que, por fin, encuentra una salida luminosa y triunfal...».

Ya tenemos la palabra. Comprender es a la inteligibilidad lo que beldar es a la belleza. Hablemos ahora del gozo mental que ambas cosas pueden producir. ¿En qué consiste y cuál es su sentido? Se trata, como vamos a ver, de otro punto de convergencia entre inteligibilidad y belleza.

En efecto, lo bello y lo inteligible comparten, creo, una profunda raíz. Atendamos primero al gozo de beldar. Ocurre en una región de de-

licadísima inestabilidad. Si en el pedazo de la realidad que observamos no hay ningún tipo de regularidad o repetición, es decir, si no hay ritmo o armonía, entonces la mente no tiene nada que resolver durante su exploración del espacio o el tiempo. En esta situación la mente se fatiga buscando, hasta que se rinde. Y al final, se frustra. Si, por el contrario, hay demasiado ritmo o demasiada armonía, entonces la mente tropieza con un problema banal, un reto de solución inmediata, trivial. La mente acaba su trabajo nada más empezar. No hay trabajo de mérito para la mente. Aquí la mente se ofende. En cualquiera de los dos extremos, la mente trata de esquivar una situación especial, aquella en la que no se cuenta con ella: el aburrimiento. La tortura del presidio está en que a uno le niegan incluso la mínima dosis de incertidumbre necesaria para vivir. El gozo mental de la belleza y de la inteligibilidad es un episodio que tiene lugar en algún punto entre la frustración y la ofensa. El grado de armonía o ritmo que produce gozo depende de la mente, muy especialmente de sus aspectos culturales. En el caso de la música, comentado en el capítulo de los fractales, el placer está, para algunos, en un grado fácil de beldar, más cerca de una canción de cuna que de un cuarteto de Beethoven. Otros, sin embargo, declaran que su punto de gozo se acerca más a la música aleatoria o dodecafónica... Algo parecido se puede comentar en pintura recorriendo diferentes estilos, desde el arte rupestre más sintético y realista al arte contemporáneo más abstracto, pasando por otros estadios intermedios, siempre como desafíos para la belda, para capturar las armonías y los ritmos más o menos ocultos. En particular, estamos hablando de dónde está ese gozo. Está en esa delicada inestabilidad que fluctúa entre la predicción y la sorpresa. Ya hemos hablado de ella. Por un lado, el gozo está en anticipar la incertidumbre.

Pero, por otro lado, el gozo está también en la predicción fallida, en ese detalle que no encaja con las pautas descubiertas. El gozo es la garantía de que el trabajo de la mente aún no ha terminado, de que siempre hay un nuevo reto. Pero, así como en ciencia la inteligibilidad no lo es todo, tampoco el arte es todo belleza. Atención, no estamos hablando de la emoción del arte, sino del gozo por percibir belleza. En particular, hablamos acerca de dónde está ese gozo. Otra cosa es saber por qué está ahí y para qué sirve, si es que sirve para algo.

Atendamos ahora al gozo por comprender. ¿En qué consiste ahora el gozo mental? El gozo por comprender está en cada nuevo caso que

podemos incluir en una particular comprensión. Lo hemos comentado en varias ocasiones. La compre*n*sión aumenta con la compresión. Cuanto más se comprime, más se comprende, porque mayor es el dominio que representa lo comprimido, es decir, más vasto es el alcance de lo comprendido. Es la diferencia entre una ley general, un modelo o un modelillo. Y apostar a que un nuevo caso pertenece al dominio de lo comprendido no es otra cosa que hacer una predicción. Anticipar. Por ejemplo, apostar a que la ley que regula la caída de una roca montaña abajo es la misma que la que regula el movimiento de un planeta alrededor del Sol. Y si anticipar es apostar, comprobar es aplicar. Eso por una parte: el gozo en la percepción de la inteligibilidad, como en la percepción de la belleza, es la constatación de una anticipación. Pero también aquí existe una rara y delicada inestabilidad. Es la idea central de lo que podríamos llamar el tercer principio del método científico, el principio dialéctico [78]. Según ese principio, una comprensión científica debe correr el riesgo de ser desmentida por la realidad. En este caso pueden aparecer dos tipos de paradoja. La primera es la paradoja de contradicción. La ciencia no puede admitir A (realidad percibida) y no A (realidad comprendida) al mismo tiempo. O falla la percepción o falla la verdad vigente. Si falla una comprensión (la apuesta para un presunto nuevo caso), hay que cambiar la inteligibilidad vigente por otra nueva. La segunda paradoja es la paradoja de incompletitud. La realidad percibida dice A y la verdad científica no dice ni A ni no A. Es decir, la realidad no se comprende. En cambio, la hipótesis de trabajo de un científico reza lo contrario: la realidad es comprensible, comprimible. Si no disponemos de una inteligibilidad, entonces hay que buscarla. El principio dialéctico es el motor del progreso del conocimiento científico. Aquí está, con toda precisión, la clave del gozo de la inteligibilidad, entre la convergencia y la divergencia de una comprensión con un nuevo pedazo de realidad. La convergencia significa predicción acertada, la divergencia es la señal de que hay que buscar una comprensión nueva, que la teoría vigente se ha agotado. Quizá sea posible encontrar una verdad más amplia donde quepa la anterior como caso particular (la historia de la ciencia está llena de estos casos). Éste es el delicado momento del gozo por la comprensión. Si una inteligibilidad lo predice todo, comprendemos mucho, pero el tedio acaba por invadirnos. Ya no gozamos comprendiendo. Si la inteligibili-

dad no predice nada, la desorientación es absoluta. Es la desesperación. El gozo por comprender fluctúa entonces sutilmente entre dos aguas, entre la predicción y la sorpresa. Como el gozo por la belleza. Si lo bello y lo inteligible comparten algo (el gozo) es que aún queda algo por comprender.

Intentemos ahondar en esta convergencia, no sea que ambos gozos tengan algo que ver. A lo largo de este ensayo han surgido las pistas suficientes para una posible solución. Existe lo que se selecciona fundamental, natural o culturalmente. Y el criterio no puede ser más claro y más fuerte: perseverar. Para estudiar las alternativas, regresemos a la ley general del cambio desarrollada en el capítulo siete. Una de ellas, quizá la más importante, es precisamente ¡anticipar la incertidumbre! Pero anticipar la incertidumbre tiene un doble filo, justamente el doble filo sobre el que descansa el gozo por la belleza y por la inteligibilidad del mundo. En efecto, anticipar la incertidumbre es bueno a la hora de seguir viviendo. Pero una de las características de la incertidumbre es que es incierta, cambia. De modo que un organismo que se especializa en una incertidumbre, es decir, se duerme en el gozo sólo de la predicción, puede tener problemas cuando la incertidumbre aprieta, es decir, cuando necesite nuevas inteligibilidades. Y eso sólo se garantiza con ciertas dosis de gozo por el fallo y la sorpresa. Comprender, percibir la inteligibilidad ayuda a perseverar en el mundo, y el gozo por esa búsqueda es el estímulo que consolida, garantiza o consagra tal prestación. Es como el hambre respecto de la nutrición, el gozo sexual respecto de la reproducción, el dolor respecto de cuidar de uno mismo... En cambio, la capacidad de beldar, de percibir la belleza y el gozo que asegura tal capacidad en la historia, no parece tener una relación directa con el mérito de perseverar en este mundo... Buena pregunta. ¿Por qué hay belleza en el mundo?, ¿por qué hay armonía?, ¿por qué hay ritmo?, ¿sirve todo eso para algo? El mundo podría ser perfectamente un mundo amorfo, sin repeticiones, sin simetrías. ¿Tiene algún sentido que no sea así? En cualquier caso, el mundo era bello mucho antes de que emergiera un individuo capaz de gozar con la percepción de su belleza. Es bien posible que esta pregunta haga sonreír, moviendo la cabeza de lado a lado, a los creyentes de corazón. ¡Vaya pregunta! Pero ya hemos anunciado que nuestra voluntad es comprender el mundo sin la ayuda de Dios.

Alguna selección favoreció el estímulo del gozo por comprender y el gozo por beldar. Pudieron ser dos selecciones independientes, pero, en ese caso, el gozo por la belleza no se explica bien. A primera vista, por lo menos, la belleza no parece involucrar ningún tipo de ventaja para permanecer en el mundo real. La otra alternativa es la de que ambos gozos están relacionados. Por ejemplo, uno podría ser la preselección del otro. ¿Qué fue antes? ¿Apreciamos la belleza de tanto comprender? ¿O más bien empezaron a comprender los preseleccionados por el sentido estético? Pero en ese caso nos encontramos de nuevo con la cuestión de una preselección difícilmente explicable. La tentación es poner la inteligencia abstracta por delante y la percepción de la belleza como una de sus tardías (y no necesariamente útiles) sofisticaciones. Esto no suena mal: se necesitaron millones de años tallando instrumentos de piedra (que ayudan claramente a perseverar en el mundo incierto) antes de que a alguien se le ocurriera pintar un toro en la pared de una caverna (para la contemplación artística o religiosa).

No suena mal pero es falso. Una aproximación más atenta a la historia de la realidad del mundo muestra que la percepción de la belleza precede con mucho a la percepción de la inteligibilidad. Creo que no hay duda de ello. Ciertas piezas de la industria lítica fabricadas por el *Homo erectus* así lo demuestran [79]. Hay evidencia de hachas de piedra de hace un millón de años de una simetría conmovedora, obsesiva; hachas que, además, ¡nunca llegaron a usarse! (figura 19.2 y, antes, 14.5). Eran instrumentos para mirar, para poseer. Simetría en este caso significa repetir un perfil como mínimo dos veces, una a cada lado. Este homínido estaba lejos aún de la inteligencia abstracta (simbólica, representativa) capaz de producir arte o ciencia. Ni siquiera se tiene evidencia de su autoconsciencia (conocimiento del yo). No tenía ritos, ni enterraba a sus muertos. Sin embargo, no hay la menor duda de su sentido estético. Siguen dos ejemplos notables que he vivido de cerca porque ambos están protagonizados por dos amigos, grandes paleoantropólogos, nada menos que Henry de Lumley y Juan Luis Arsuaga. Ambos han pasado por el museo para hablar de su trabajo. El primer caso me dio la primera pista. Así lo viví en su día:

A mi lado diserta Henri de Lumley, una leyenda viva de la paleoantropología. A nuestra espalda, en una gran pantalla, brilla la imagen de un hacha de sílex concebida por un *Homo erectus* hace casi medio mi-

Figura 19.2. Bifaz fabricada por el *Homo erectus* hace unos 580.000 años (cueva de Aragó, Tautavel, Francia; dibujo de Olivia Cuadra).

llón de años. Trato de imaginar al remoto autor de tanta perfección, cuando se oye la voz del profesor Lumley pronunciando la expresión «su sentido estético». ¿Cómo ha dicho? ¿Cuándo se ha escrito que el *Homo erectus* tuviera sentido estético? Ahora, el remoto individuo que imagino se pone a contemplar su propia obra mientras, embelesado, la hace girar entre sus dedos. La mira, la vuelve a mirar y, de vez en cuando, le da un penúltimo toquecito para corregir, aún más si cabe, su obsesiva simetría bilateral... Incluso llega, siempre en mi imaginación, claro, a requerir la atención de un compañero para arrancar de éste una mueca de admiración...

El sentido estético no figura entre las cinco grandes efemérides que coronan la carrera hacia la humanidad. Un homínido anterior, el *Homo habilis,* el inventor de la industria lítica, nunca buscó simetría, sólo eficacia. Por ello, en este caso, Lumley habla de estética, porque la simetría no aporta nada a la utilidad del útil. Es un gozo para la vista, un gozo para el tacto, un gozo para poseer. Unos millones de años antes, el *Australopithecus afarensis* había iniciado la carrera hacia la humanidad poniéndose de pie (primera efeméride). Con el bipedismo se otea mejor el horizonte de la sabana, las crías huyen más seguras en brazos de sus madres y, sobre todo, con las manos libres se abre el camino para pasar de la teoría a la práctica, para el desarrollo del cerebro. Así llegamos al *Homo habilis,* que con la industria lítica (segunda efeméride) extiende las prestaciones de la mano mucho más allá del cuerpo. Después le toca el turno al *Homo erectus,* cuya contribución notoria a la evolución es el fuego (tercera efeméride). Con fuego se come mejor y se es comido peor, se regula la temperatura ambiente, se alarga la luz del día y aumenta la relación familiar y social... El *Homo neandertha-lensis* se presenta mucho más tarde (cuarta efeméride) con las primeras tumbas rituales. Es la conciencia del yo, el qué será de mí, la emergencia de las creencias, del más allá y del más aquí. Finalmente, llega el *Homo sapiens* con el símbolo y la inteligibilidad científica (quinta efeméride). Y con ella se come el mundo. Si todo eso es cierto, entonces resulta que el sentido estético precede con mucho a la autoconsciencia y al conocimiento abstracto. Quizás haya que añadirlo como otra gran efeméride.

En efecto, el conocimiento complejo humano actual tiene, creo, tres componentes: una científica, una revelada y otra artística. La pri-

mera evidencia de conocimiento científico tiene unos treinta mil años y es un dibujo rupestre. La primera evidencia de conocimiento revelado tiene más de cien mil años, es una tumba ritual. La primera evidencia de conocimiento artístico tiene casi medio millón de años, es un hacha simétrica de piedra. Primero fue el arte, luego la revelación y luego la ciencia.

Pocas semanas después, el hacha de la pantalla está en mi mano. Estoy en Tautavel, la catedral del *Homo erectus*. Me he apostado en la terraza de la entrada de la cueva de Aragó, desde donde se divisa uno de los paisajes más bellos de Francia. Ahora imagino al remoto individuo aquí a mi lado, en cuclillas, con este mismísimo objeto en su mano, y boquiabierto, como yo, ante un atardecer glorioso. Casi se me saltan las lágrimas.

El segundo caso se parece mucho. Arsuaga nos da la primicia durante la cena, después de su conferencia en el museo. Le brillan los ojos cuando lo dice:

—Hace cuatro años encontramos en la Sima de los Huesos (Atapuerca) una pieza extraordinaria. Se publica la semana que viene...

Arsuaga se refería a *Excalibur* (en honor de la espada mágica del rey Arturo), una bellísima hacha bifaz de 155,8 milímetros de longitud máxima por 98,5 milímetros de ancho y 49,9 de grosor. La piedra es una rara cuarcita de dos colores, rojo y ocre. Su impresionante simetría cortante no ha sido alterada por uso alguno. Está claro que el fabricante del instrumento escogió con cuidado la piedra en el río. La seleccionó por su belleza. Un bonito ejemplo de selección cultural. No son pocas las convergencias: la belleza de la pieza, su virginidad para el uso, su antigüedad de unos 400.000 años y el tipo de homínido que la fabricó y poseyó, ya que la distancia entre el *Homo erectus* y el *Homo antecesor* es, si es, mínima. Los tres codirectores del proyecto de Atapuerca, Arsuaga, Carbonell y Bermúdez de Castro, dieron un salto enorme a la hora de interpretar:

—*Excalibur* forma parte de un rito funerario, por lo que es el vestigio más antiguo de la mente autoconsciente, de la mente simbólica, algo exclusivamente humano.

Conozco, quiero, admiro a los tres codirectores y agradezco la facilidad con la que se cuenta con ellos para el museo. Son grandes científicos y generosos comunicadores. Pero cada vez que me encuentro

con alguno de estos tres amigos, le pido (me lo pide el cuerpo) que pruebe, una vez más, a convencerme de una afirmación tan audaz. La pieza se encuentra junto a restos de homínidos, de acuerdo. La pieza es bellísima, sublime; de acuerdo. La pieza no ha sido usada, de acuerdo. Una herramienta no usada no es necesariamente un objeto de contemplación (si ahora se acabara el mundo, nadie de un lejano futuro debería interpretar así el material *no vendido* de una ferretería) pero sí es más probable que lo sea. Sin embargo, podría pertenecer a cualquiera de los individuos acumulados allí que, como en el caso del hombre de la cueva de Aragó, la poseía por simple gozo estético. No hay una sola evidencia de inteligencia abstracta ni de sentido de la propia conciencia, salvo la conjetura de que se trata de un enterramiento. Tampoco hay evidencias en contra de que lo sea, de acuerdo. Pero tampoco las hay en contra de que el *Homo antecesor* jugara al ajedrez. Queda mucho por desenterrar y quizá se confirme algún día la tesis de mis buenos amigos. Así que, de momento y en el peor de los casos, *Excalibur* es una prueba (una más) de que el gozo por la belleza es anterior al gozo por el conocimiento abstracto. Eso es lo que comparten los casos de Aragó y Atapuerca.

El gozo por la belleza precede al gozo por el conocimiento abstracto. Pero nos queda una pregunta pendiente: ¿por qué fue favorecido por la selección? Creo que existen dos posibles respuestas, que no se excluyen mutuamente. La primera es que ciertos placeres (o dolores), que alcanzan el cerebro por alguna vía sensorial, están asociados a detalles de la realidad que favorecen o amenazan directamente la perseverancia en este mundo. La segunda es que, sencillamente, ciertos episodios de la realidad son frecuentes. Es decir, por alguna selección previa resulta que hay detalles de alta presencia en el entorno de un individuo. Tal cosa, indirectamente, puede interpretarse como una buena señal para perseverar. Si es frecuente es que se repite, si se repite es que la incertidumbre es menor. Significa que estoy en casa, que todo va bien.

La naturaleza está llena de repeticiones y regularidades. No está demasiado llena ni demasiado vacía. Hay una especie de punto intermedio mágico. La naturaleza está críticamente llena de armonías y ritmos. La naturaleza funciona gracias a sus armonías y ritmos. La armonía y el ritmo son el contrapunto de la incertidumbre y el núcleo duro

de su inteligibilidad. Mucho antes de que emerja el primer tímpano, los objetos ya vibraban según sus particulares frecuencias propias y sus correspondientes frecuencias armónicas (múltiplos de las fundamentales, según las reglas descubiertas ya por Pitágoras). Existe una alta probabilidad, por lo tanto, de que ciertas frecuencias «suenen» juntas. Es decir, mucho antes de la emergencia del primer oído, ciertas notas y sus múltiplos sonaban, con diferente intensidad, pero al mismo tiempo. Luego vino la coevolución, esto es, el tímpano evoluciona percibiendo ciertas relaciones de notas con mayor probabilidad que otras relaciones. De este hecho surge quizás el gozo de la música tonal. Por lo menos en principio. Luego la cultura ya se encarga del contrapunto, de la disonancia... Lo hemos anunciado, el gozo mental por la belleza está asociado a cierto grado de repetición en algún punto entre la predicción y la sorpresa. Insistamos. No hay gozo si todo es sorpresa, ni lo hay si nada hay que predecir. No hay gozo si todo se puede predecir, ni lo hay si nada es sorpresa. El gozo mental corresponde a una particular receta de orden y contingencia.

Cada uno de los sentidos (o bien, cada una de las vías seguidas por un estímulo físico exterior para alcanzar el cerebro) experimenta un gozo característico que procede de la realidad preexistente. Para el oído podría ser, por ejemplo, la música tonal. La prueba está en que un bebé se tranquiliza con música tonal y puede inquietarse mucho con una música serial aleatoria. La tonalidad cambia con las culturas, pero existe un núcleo común, una inteligibilidad que procede de nuestra raíz común. Los colores son las notas de la visión. La armonía de colores de nuestro gozo mental es muy variada. Se diría que el gozo por el color depende mucho de la cultura particular. Sin embargo, hay algún color concreto que despierta pasiones a lo largo y ancho de la geografía y la historia. El color del oro. Lo dorado. ¿Cómo entender la universalidad del oro? Quizá por su alta frecuencia en cualquier paisaje bañado por la luz solar. Quizá porque está asociado a que todo va bien, porque nos hace sentir seguros, porque ahuyenta las sombras... ¡El sol sale cada día! ¡Y qué pánico si un día resulta que no sale! Se trata de una fuerte convergencia. ¿Qué cultura no adora el oro? El dorado es en efecto el color del Sol. Es la luz, la energía primera de cualquier cosa sobre el planeta... El color del Sol, del ámbar, del oro es universal y transculturalmente apreciado... Con motivo de una exposición que hi-

cimos en el museo sobre el ámbar, llenamos una vitrina enorme con todos los objetos que pude encontrar, en pocos minutos, en unos grandes almacenes con el color dorado del ámbar: licores, perfumes, peines, caramelos... (sin acudir a joyería ni bisutería).

Lo mismo podríamos decir de la suavidad respecto del tacto y atribuirlo a la relación entre el bebé y el pecho materno. Lo mismo podríamos decir de lo dulce respecto del sabor y atribuirlo al hecho de que casi todas las cadenas metabólicas acaban en una sustancia llamada glucosa. Lo dulce precede con mucho al invento de la papila gustativa. ¿A qué niño le amarga un dulce? Lo amargo, por ejemplo el café, es ya un contrapunto de selección cultural. Las combinaciones son interminables. El café huele mejor de lo que sabe y el pescado sabe mejor de lo que huele. El olor a tostado produce gozo (alguien cocina por el entorno), el olor a quemado produce pánico (estamos en peligro de ser alcanzados por un incendio). Los animales con gozo por el olor a quemado no han dejado descendientes por razones obvias. En suma, nuestros sentidos proyectan gozos en nuestro cerebro que proceden de las armonías y los ritmos propios de la realidad dentro de la cual han evolucionado.

Ahora, compliquemos las cosas. Imaginemos, no un sentido aislado, sino el conjunto de los cinco sentidos proyectando complejidades de la naturaleza en el cerebro. Hay un sinfín de combinaciones sensoriales posibles, combinaciones binarias (olor con imagen, tacto con imagen, olor con sabor...), combinaciones de tres sentidos, de cuatro... Existen pocas experiencias que requieran los cinco sentidos a la vez (la gastronomía y, como mínimo, un caso más). En suma, la física y la química de la señal exterior entra por la fisiología del cuerpo y crea una complejidad psicológica con cierta probabilidad de convertirse finalmente en un gozo cultural. En otras palabras, la mente ha evolucionado sumergida en la naturaleza. Ha coevolucionado con ella, con su incertidumbre, que es lo mismo que decir con su ración característica de armonía y ritmo. Por lo tanto, quizá no sea aventurado asegurar que la ración de orden que provoca el gozo prístino por la belleza (esa región de delicada inestabilidad de la que venimos hablando) quizá sea, en principio y justamente, la misma ración de orden propia de la naturaleza. Es la referencia.

En efecto, los objetos de la naturaleza exhiben una armonía y un ritmo. La geología, por ejemplo, traduce el espacio en tiempo. Cuando

la erosión del viento y el agua descubre una pared vertical de una montaña de roca sedimentaria, se pueden observar los finos estratos horizontales. En el Parque de los Varvitos de Itú (Brasil) es posible contemplar los estratos de sedimentación más espectaculares de todo el planeta. Se puede seguir la sedimentación de materiales en el fondo del mar o de un lago, estación por estación durante cientos de miles de años, a lo largo de unas decenas de metros, cada año unos pocos milímetros. La biología está repleta de simetrías y de periodos temporales. Las plantas desparraman su fractalidad en hojas, raíces y ramas. Es la iteración de un modelo simple para crear complejidad en niveles de observación progresivamente reducidos. Son ejemplos de ritmos y armonías del entorno dentro del cual se ha fraguado la mente. Empieza con los primeros seres dotados de movilidad y llega hasta la inteligencia abstracta. Existe por lo tanto una componente del gozo mental que viene de muy lejos y que procede de esta lenta y larga evolución conjunta. Por ello quizá se pueda afirmar que la esencia del gozo mental acaso funcione con la misma cantidad de ritmo y armonía que observamos en la naturaleza. En otras palabras, el demasiado previsible o el demasiado imprevisible antes comentado, quizá se mida respecto de este patrón, el orden natural de las cosas. Esto significa que el gozo mental es una propiedad común a todos los individuos humanos y quién sabe cuántas otras especies animales. Es una prestación muy universal porque está asociada a la física, la fisiología y la psicología de la percepción de la incertidumbre del mundo que nos rodea. La física de los estímulos exteriores es rigurosamente la misma para los seres vivos que las perciben. Y tales seres comparten cierta fisiología de sus órganos sensoriales porque también comparten aventuras y desventuras evolutivas. Luego viene la psicología y la cultura. Y resulta que algo queda. Es decir, el gozo inicial del ritmo y de la armonía emerge y se consolida en el interior del individuo, quizá por reflexión del ritmo y la armonía del mundo exterior. Ya estamos cerca de explicar cómo la selección natural favorece algo tan inútil como el gozo estético, un premio a cambio de nada.

He aquí una fantasía de cómo pudo ocurrir. La mente fabrica útiles para prolongar las prestaciones del cuerpo: pinchar, cortar, moler, rascar, percutir, lanzar, etcétera. Para eso no hace falta una inteligencia abstracta, sólo millones de años de ensayo-error fabricando funciones.

(Recordemos: la función es la plusvalía que adquiere cualquier detalle por el mero hecho de haber sido seleccionado fundamental, natural o culturalmente.) La mente usa útiles para fabricar otros útiles y para repararlos. Y, de repente, surge una novedad. Una mente fabrica un objeto previamente seleccionado para algo, pero no lo usa para ese algo. Le cambia la función. La nueva función no tiene aparente utilidad. No aporta nada que tenga que ver con la ilusión de seguir vivo. No es para cazar ni para pescar, no es para comer ni para no ser comido, ni para atacar ni para defenderse, no es un símbolo de nada, no es para intervenir en un rito. La novedad es que una herramienta diseñada para tener un uso cambia de uso, donde el nuevo uso es justa y aparentemente no tener ningún uso. La novedad reside en el hecho de que el objeto sólo es para contemplarlo, para poseerlo. Se trata de un desprecio a la eficacia. Entonces, ¿por qué se selecciona? Resulta que la herramienta tiene simetría bilateral, la misma que el rostro y el cuerpo de sus familiares, como casi todos los animales, como tantas hojas... Tal vez se trate incluso de la simetría más frecuente de su entorno. Es la simetría que identifica el grado de incertidumbre de su entorno. Es el grado de incertidumbre al que la mente, y el cuerpo propietario de ésta, ya se han adaptado. Es el grado de incertidumbre previsible. Por ello la simetría que representa ese grado de incertidumbre está asociada a que *todo va bien*. Así se selecciona el gozo por la simetría y el gozo por la belleza, igual que el placer por lo dorado como color asociado al sol que sale cada día, igual que lo dulce como sabor asociado a la energía necesaria para vivir, igual que lo suave como tacto asociado a la protección maternal de los mamíferos...

El paso del gozo por lo bello al gozo por lo inteligible es quizá más fácil de explicar. Parece que el tránsito fue, si hubo tal, muy lento. El gozo por la belleza está ligado al ritmo y la armonía propios de la naturaleza, a sus regularidades en el espacio y el tiempo, a lo que se repite aquí o allí, en lo que vuelve hoy y acaso regrese mañana, en ciertas cosas comunes que se perciben en sucesos y objetos aparentemente distintos. O sea, el gozo por beldar está ligado a cualquier tipo de simetría en el espacio o en el tiempo. Quizás esté aquí la clave. Los seleccionados por disfrutar del gozo de la belleza estaban especialmente preparados para acceder al conocimiento abstracto. Para decirlo con un ejemplo simple y claro: el primero que cayó en la cuenta de que la primavera

volvía cada año fue probablemente un gozador de la belleza, en particular de la belleza primaveral. Según esta idea, la percepción de lo bello no sólo precede a la percepción de lo inteligible. Yo diría incluso que lo bello predispone a lo inteligible. Beldar predispone a comprender.

Ya tenemos una sólida y antigua conexión entre inteligibilidad y belleza. Sigamos. Hay un detalle que me sorprendió mucho en la época en que empecé a frecuentar los museos de ciencia de la llamada nueva generación. Todos, o casi todos, emanan inteligencia e inteligibilidad pero ¿por qué demonios son todos, o casi todos, tan imperdonablemente feos? Por el mismo precio... ¿no pueden emanar también belleza?

Arte y ciencia son dos formas de conocimiento con distinto método [78]. De acuerdo. En arte, el creador, el ejecutor de lo que hemos llamado la selección cultural puede inclinarse por la opción de la inteligibilidad, pero es una opción, no una obligación. Hay artistas que renuncian a la inteligibilidad y no por eso son menos artistas. La grandeza del arte acaso está en que puede intuir sin necesidad de comprender. Hay casos conmovedores.

Pablo Picasso es uno de ellos. Un día, ojeando un catálogo del Museo Picasso de Barcelona [80] tuve un gran sobresalto. La obra reproducida en la página 196 de dicho texto se me antojó un guiño personal del artista, como si éste hubiera estado espiando mis pensamientos durante las últimas semanas. Se trata de una serie de ocho grabados *(El Toro,* 1945-1946, Pablo Picasso, Museo Picasso de París) en la que desnuda el concepto «toro» de todos sus matices hasta llegar a la esencia de tal concepto con un dibujo de una sola línea, una precisa e intensa intuición artística de lo que es la inteligibilidad científica. El primer grabado es una primera reducción (compresión y, por lo tanto, también compre*n*sión). Cualquier dibujo es una primera forma de conocimiento, cualquier dibujo separa ya algo de lo esencial de algo de lo accesorio. Pero en este caso el proceso continúa de grabado en grabado, hasta alcanzar el resultado final, una delicada línea que tiene todo lo que tiene que tener un toro para serlo, los cuernos, los genitales, un cuello (potente), la cabeza (irrelevante), etcétera. Es lo que todos los toros tienen en común, la inteligibilidad toro. Para comprender un toro según Picasso, nada como copiar las figuras de estos grabados (figuras 19.3 y 19.4) hasta que uno sea capaz de hacerlo con seguridad

y de memoria. Ahora, armados con tal inteligibilidad, podríamos volver a la realidad para tratar de comprender lo que suele hacer un toro (sobre todo en la plaza, que es el único lugar donde sospecho que Picasso veía toros): pasear, trotar, otear, embestir, correr, luchar, jadear, agonizar, morir... Casi me desmayo al pasar la página y encontrarme, en la 195, con el grabado contiguo. En él aparecen 48 figuras de toro en las más diversas situaciones, de paseo, trote, oteo, embestida, carrera, lucha, jadeo, agonía, muerte... Picasso aplica y explota la inteligibilidad lograda en la investigación del concepto «toro». Si no llega a estar muerto, me habrá abalanzado a su encuentro para abrazarle. Los primeros grabados de la serie se pueden comparar a la simple acumulación y ordenación de observaciones de los caprichos de los astros en el cielo de la noche. Los dos grabados siguientes se pueden asociar al conocimiento acumulado por Copérnico; en él se incluyen ya algunas regularidades muy generales. Los penúltimos grabados corresponden ya a las tres reglas de Kepler para el movimiento planetario. Y los últimos son, con todo merecimiento, las leyes de la mecánica y la gravitación de Galileo y Newton. Ya estamos en disposición de aplicar la mecánica y la gravitación a cualquier problema, desde la formación de los brazos espirales de una gigantesca galaxia al movimiento de un microorganismo que rema con sus minúsculos cilios. Nunca menos ha explicado tanto. El gozo por la belleza es grande. El gozo por la inteligibilidad es grande. Y el de la combinación de ambas, a veces, como en este caso, casi insoportable.

También se puede hablar de belleza en ciencia, la belleza de una ley, de una ecuación... Alguien ha hecho observar que la rápida aceptación que tuvo la teoría de la relatividad general de Einstein, el convencimiento que enseguida logró de la comunidad científica se debió a la extrema elegancia de las ecuaciones. No hay ciencia sin inteligibilidad, aunque quizá sí arte sin belleza. Pero ni la ciencia es sólo inteligibilidad, ni el arte es sólo belleza. La verdad científica, además de inteligible ha de ser objetiva y dialéctica. Una obra de arte, con belleza o sin ella, ha de ser capaz de transmitir una complejidad de una mente a otra. Lo importante aquí es que tanto en ciencia como en arte es posible comprender y beldar, captar inteligibilidad y belleza. Pero hay algo más que se puede hacer con un pedazo de realidad en ambas formas de conocimiento: intuir. Es el concepto que nos falta, porque en este final

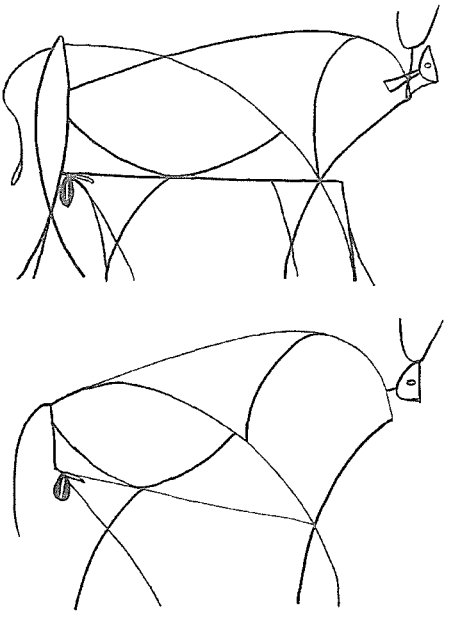


Figura 19.3. Dibujo del autor en el que copia la antepenúltima y penúltima figuras de la secuencia *El Toro,* 1945-1946, de Pablo Picasso. Copiar la búsqueda picassiana de la esencia del concepto «toro» es una buena manera de comprender tal búsqueda.

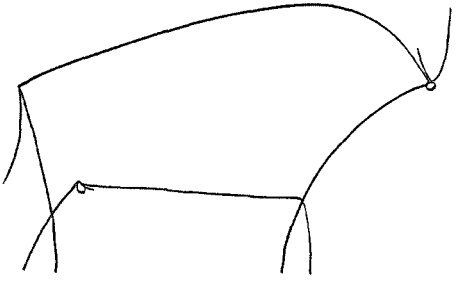


Figura 19.4. Dibujo del autor en el que copia la última figura de la secuencia *El Toro,* 1945-1946, de Pablo Picasso. Es la esencia final. Copiarla ayuda a comprenderla.

se trata de hablar de las intuiciones científicas que ciertos artistas han tenido de las formas de la naturaleza.

Antes de definir la intuición, aprovechemos la ocasión para reiterar lo que entendemos por comprender. *Comprender* es relacionar una realidad con algo más compacto que ella misma y, en el límite, con su propia esencia. El vuelo de una mosca y la caída de un meteorito se comprenden porque ambos se reducen a una misma esencia irreductible: las leyes de la mecánica. En tal compresión está su compre*n*sión (curiosamente, lo que ya no se comprende son las leyes fundamentales, por eso: por ser fundamentales, por ser incompresibles). Descubrir una nueva esencia significa ganar conocimiento. Y cada nueva esencia adquirida multiplica nuestra capacidad para comprender el mundo que nos rodea. O sea, la capacidad para comprender el mundo depende del conocimiento acumulado.

Intuir es relacionar, quizá sólo rozar, una realidad con otra realidad que, comprendida o no, ha sido largamente percibida. La trayectoria de una pelota después de un raquetazo se intuye después de ver mucho tenis. Aunque no se comprenda. La intuición es una revelación de la propia mente, una mente que se nutre con cada nueva percepción. O sea, la capacidad para intuir depende de la riqueza de nuestra vida cotidiana. «El más viejo del lugar» no comprende mejor, lo que hace mejor es intuir. Pero la percepción humana tiene lugar en una realidad muy estrecha respecto de todo lo que acontece en este mundo. No vemos lo demasiado pequeño, ni lo demasiado rápido, ni lo demasiado grande, ni lo demasiado complejo, vemos pocos colores, oímos pocas notas, olemos poco y a muy corta distancia... Por ello, aunque se puede intuir sin comprender y comprender sin intuir, nuestra capacidad para comprender supera en mucho nuestra capacidad para intuir.

Intuir y comprender al mismo tiempo, así como intuir y beldar a la vez, no son experiencias imposibles. De hecho, suponen los instantes del gran gozo de una mente pensante. La matemática es una construcción mental inspirada en la realidad, aunque no le adeude por ello la menor concesión. Podemos usar de nuevo la imagen del punto que se mueve para hablar de intuiciones y comprensiones: un punto geométrico es un ente matemático de *dimensión cero*, cosa que intuimos y comprendemos porque es el aspecto al que tiende un cuerpo extenso que se aleja hacia el infinito. También intuimos y comprendemos la *di-*

mensión uno propia de una línea porque así es la estela que deja tras de sí un punto sin dimensión cuando se mueve en el espacio. Y también intuimos y comprendemos la *dimensión dos* propia de una superficie porque así es el rastro del movimiento de una línea de *dimensión uno*. Y también intuimos y comprendemos *la dimensión tres* de un volumen porque así es el espacio barrido por el movimiento de una superficie bidimensional. Sin embargo, la cuarta dimensión construida por el movimiento de un volumen tridimensional ya sólo se comprende. Aquí se bloquea para siempre nuestra imaginación espacial: el movimiento de un volumen engendra otro volumen y nada de nuestra percepción cotidiana sirve para *ver* un hipervolumen de más de tres dimensiones. La intuición se queda, la comprensión continúa. Los físicos manejan y comprenden muchas dimensiones en una gran diversidad de sistemas, pero no las intuyen, ni las ven, aunque a veces se dejan admirar como si así fuera. Es aquí donde vale la pena citar la intuición convergente del matemático Thomas Banchoff en los años setenta y la del pintor Salvador Dalí en los cuarenta. Dalí se adelantó treinta años a Banchoff y se enteró, por un artículo del *Washington Post,* de las hazañas hipercúbicas del matemático para visualizar la cuarta dimensión. Banchoff se había convertido por aquella época en la estrella de la cuarta dimensión. Físicos, filósofos y artistas confiaban en él para dar con alguna pista capaz de desbloquear sus mentes. Dalí lo hizo llamar y se conocieron. Luego, según creo, ha sido, con mucho, el científico que más intensa y larga relación ha tenido con Dalí. La gran sorpresa del matemático fue saber de labios del maestro que la inspiración del pintor procedía del místico y matemático medieval Ramon Llull. La sorpresa mayúscula del artista fue constatar que Banchoff sabía perfectamente quién era Llull.

En la figura 19.5 he dibujado un esquema de cómo podemos romper el bloqueo que sufre la mente cada vez que ésta se propone visualizar un hipervolumen, la cuarta dimensión espacial. Tomemos nuevo impulso e intentémoslo de nuevo. Ahora partimos de un segmento de recta, un lugar geométrico de dimensión uno (figura 19.5a). Para alcanzar la dimensión dos nos vamos a los límites de la figura anterior, los dos extremos del segmento, y añadimos dos segmentos iguales (19.5b) con ánimo de marcar un cuadrado. Pero para abrazar un cuadrado falta un nuevo segmento que cierre los dos nuevos extremos que

han quedado abiertos. Lo hacemos. Ya tenemos un cuadrado (19.5c), la dimensión dos. Es un cuadrado aprisionado por cuatro segmentos como el de partida. Ahora procedemos de manera similar con ánimo de alcanzar la dimensión tres. ¿Cómo hacer un cubo con un cuadrado? Nada más fácil e intuitivo. Nos vamos a los límites del cuadrado, sus cuatro lados, y añadimos cuatro cuadrados iguales (19.5d) con ánimo de marcar un cubo. Pero para abrazar un cubo que no quede abierto (19.5e) falta aún añadir un cuadrado (19.5f). Este cuadrado hará las veces de tapa para obtener un cubo perfecto (19.5g). Y ahora llega la hora de la verdad. Partimos del cubo completo (19.5g) y, por un procedimiento similar a los dos anteriores, nos dirigimos por fin a un hipercubo, la cuarta dimensión. Para empezar, vamos a los límites del cubo, a los seis cuadrados que le dan forma, y añadimos un cubo a cada cuadrado con ánimo de abrazar un hipercubo, un volumen de dimensión cuatro. Así obtenemos un extraño volumen de siete cubos (19.5h). La mente, como siempre que llegamos a este punto del intento, ya no *ve* nada, se ha bloqueado. Pero ahora tenemos una idea para continuar. Nuestra mente ya no intuye, pero comprende, y se trata de usar nuestra capacidad de comprender para ayudar a nuestra capacidad de intuir. Por inducción, si todo sigue como en los dos pasos anteriores (el que une la dimensión uno con la dimensión dos y el que une la dimensión dos con la dimensión tres) debemos añadir un cubo más a la figura de siete cubos (19.3h) si con ella queremos cerrar un hipercubo de cuatro dimensiones. El resultado es un bello volumen de ocho cubos (19.5j). Es la sala de espera de la cuarta dimensión. ¿Qué tal? Ahora sólo queda llevar nuestra atención hasta un cuadro de Dalí, el *Corpus hypercubus,* pintado en 1954 (véase la figura 19.1 con la que abrimos este capítulo). Dalí pintó el cuadro más de veinte años antes de que el matemático Thomas Banchoff popularizara la geometría del hipercubo.

La física cuántica y la física relativista se comprenden mucho mejor de lo que se intuyen. La teoría de la evolución de las especies, hoy, se intuye bien aunque aún no se comprenda del todo. He aquí el gran mérito de la ciencia: se comprende sin necesidad de intuir. He aquí la grandeza del arte: se intuye sin necesidad de comprender. Así llegamos a nuestro objetivo: a la intuición científica en el arte. Existe. En este volumen han ido desfilando algunos ejemplos a propósito de las for-

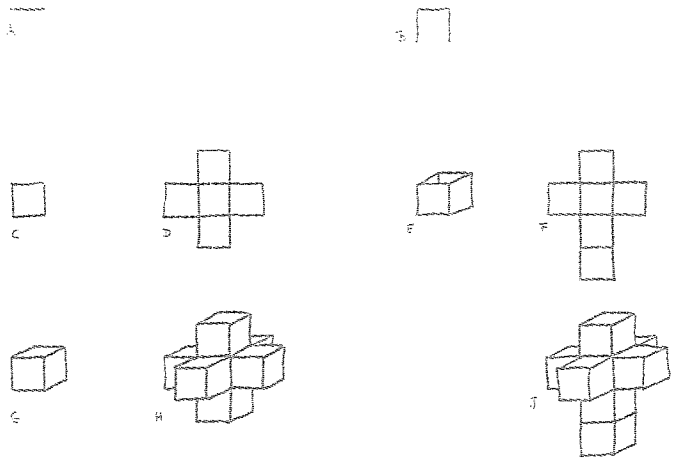


Figura 19.5. Hipercubo. Aproximación intuitiva hasta las mismas puertas de la percepción de la cuarta dimensión espacial a partir de la unidimensionalidad de un segmento.

mas de los objetos. El arquitecto Gaudí ha sido una constante. Picasso es otro gran ejemplo. En tal concepto he encontrado además un camino para añadir belleza a los museos de ciencia. Pero el caso más curioso, no sé todavía si relevante, es el que sigue y que sirve de postre para este segundo epílogo. Se trata de una intuición científica desde el arte.

Las nueve formas presentadas en la segunda parte no son el producto de una investigación sistemática. Se trata más bien de un resultado informal, de un ejercicio de observador. Por ello ni siquiera nos hemos arriesgado a ordenarlas por su frecuencia en la naturaleza. De hecho, la catenaria y la parábola son menos frecuentes que los cilindros, que no hemos mencionado aparte (por estar incluidos como un caso de simetría circular). Por ello, cualquier comentario de síntesis tendrá también ese carácter provisional e inacabado. Pero, una vez admitido todo eso, atendamos por un momento a las nueve formas elegidas. Creo que un estudio más riguroso demostraría en todo caso que las formas geométricas más frecuentes en la naturaleza se pueden reducir a dos familias: las derivadas de la simetría circular y los fractales. La espiral es una circunferencia que emigra en el plano que la con-

tiene, la hélice en la dirección perpendicular, el hexágono se obtiene por hacinamiento de circunferencias flexibles, la onda se puede obtener como la traslación de una proyección de un movimiento circular, la parábola o la punta entendida como la de un cono son casos particulares de una cónica, como la propia circunferencia... En resumen, de las formas revisadas sólo los fractales y la catenaria (una curva logarítmica poco evidente en la evolución de la materia) no son reducibles a círculos mediante una transformación sencilla. Por ello repetimos la intuición. Se diría que las formas geométricas más relevantes en el mundo, en el inerte, en el vivo y en el culto, se reducen (recordemos: se comprenden) a dos: círculos y fractales. Tal es la feliz conclusión que puede extraer un matemático después de hojear la segunda parte de este volumen. Es como si, en el fondo, la naturaleza estuviese hecha de círculos y fractales. Es como si el mundo fuese una construcción creada juntando y combinando dos clases de piezas plásticas, círculos y fractales.

Pues bien, también se puede llegar a esta curiosa preconclusión por otro camino, un camino que no pasa por la matemática, la filosofía, la física, la biología o la geología. Algunos artistas lo han hecho. Han tenido una intuición científica sin salir del arte. Mencionaré tres de ellos. Los dos primeros son dos ilustradores anónimos de la Biblia. Ambos recibieron, con algunos siglos de diferencia, un encargo muy parecido: diseñar la portada del gran libro. Es fácil imaginar la preocupación con la que ambos debieron de regresar a casa aquella noche. ¿Y ahora cómo represento yo la creación del mundo? ¿Cómo simbolizar la obra de Dios en una página? ¿Cómo comprimir Todo, lo que es y lo que ocurre, lo que ha sido y ha ocurrido y lo que será y ocurrirá, con belleza y espiritualidad? Ambos tenían una doble cuestión de inteligibilidad y belleza que resolver, quizás incluso triple, pues el encargo afecta de pleno a las tres grandes clases de conocimiento posibles, el científico, el artístico y el revelado. El resultado de ambos artistas fue convergente, convergente entre sí y con la intuición científica. Como puede comprobarse, las dos ilustraciones son bien diferentes, pero en ambas dominan claramente dos formas, círculos y fractales. La primera corresponde a la *Bible Moralisée* (1220-1250), conservada en la Biblioteca Nacional de Austria en Viena, códice 2554 (figura 19.6). Aquí el artista intuye a Dios, con un compás en la mano, junto a su

obra de Gran Arquitecto, un mundo recién hecho con círculos y fractales. La leyenda, en francés antiguo, dice nada menos que: *Ici crie dex ciel et terre, soleil et lune et toz elemenz* («Aquí crea Dios el cielo y la tierra, el sol y la luna y todos los elementos»). La segunda pertenece a una Biblia mucho más antigua. Aquí la hegemonía de los círculos y fractales aún es más evidente: en el mismo centro de la imagen la figura mítica del Uroboro se devora a sí mismo circularmente, frente al paisaje fractal de un árbol desnudo (Podemos contemplarla en *Uraltes Chymishes werk*, de Abraham Eleazar, 1760) (figura 19.7).

El tercer artista es Gaudí. Otra vez Gaudí [81]. No debería ser ya una sorpresa. Lo hemos citado en casi todas las formas. Ha quedado bien probado que en su arquitectura emergen las mismas formas geométricas que en la naturaleza. Y no sólo eso. Las formas emergen en la arquitectura de Gaudí (por selección cultural) cumpliendo las mismas funciones que cumplen (por selección natural) en la naturaleza. La serie de figuras que van desde la 19.8 hasta la 19.20 forma una pequeña colección de dobles imágenes, a la izquierda la naturaleza, a la derecha Gaudí. Pero ¿vio también Gaudí la síntesis de los círculos y los fractales? Sí. Y la evidencia no está en cualquier lugar sino en su obra magna. Basta visitar el templo de la Sagrada Familia en Barcelona y elevar la vista hacia las alturas (figura 19.21). Dos formas destacan sobre las demás: círculos y fractales. Las columnas se desparraman fractalmente como las ramas de un árbol al llegar a la cubierta superior, donde reparten la reacción de la carga. Las columnas colonizan la cubierta. Y entre tales entregas de carga, círculos, círculos y más círculos. Su intuición científica es comparable a la de los ilustradores de la cubierta de la Biblia citados más arriba. Gaudí era arquitecto y los arquitectos también son científicos. Mal iría si en su trabajo no trataran de anticipar la incertidumbre. La arquitectura, lo hemos comentado en su momento, se puede incluso definir como una tecnología (una forma de cambiar el mundo) dedicada justamente a reducir la incertidumbre ambiental. Está claro que el uso de la catenaria es algo más que la intuición científica de un artista y está claro también que Gaudí es un caso de selección cultural explícitamente inspirada en la selección natural. Lo dijo en algún momento de su vida: mi maestro es el árbol que veo cada día camino del trabajo. Pero Gaudí no se planteó nunca una teoría de la forma ni una reflexión de acuerdo con el método de la ciencia.

Figura 19.6. Cubierta de la Biblia, *Bible Moralisée* (1220-1250), Biblioteca Nacional de Austria, Viena, códice 2554.

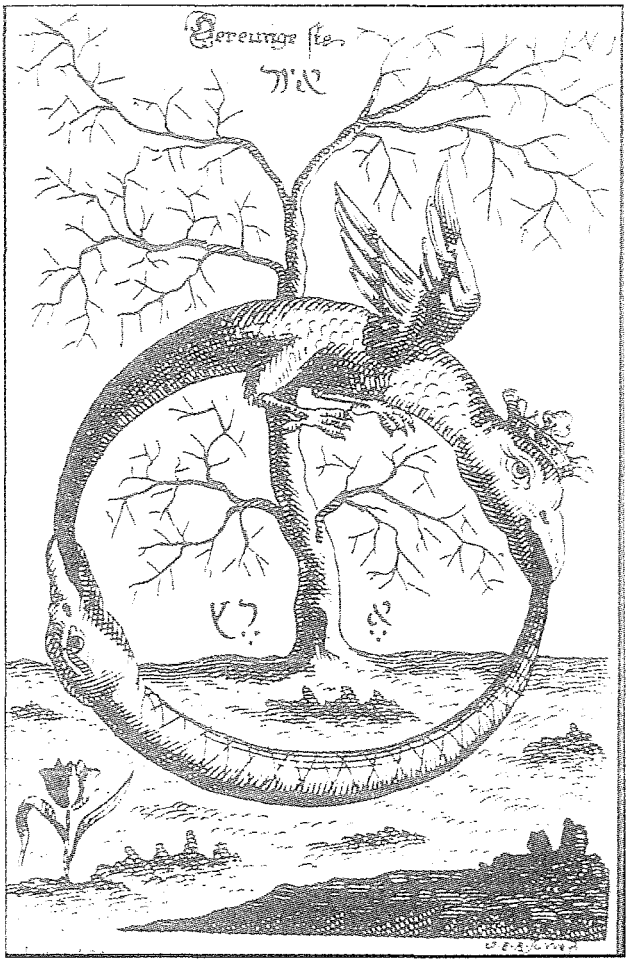


Figura 19.7. Cubierta de una Biblia medieval. La imagen ha sido tomada de *Uraltes Chymishes Werk*, texto de Abraham Eleazar, 1760.

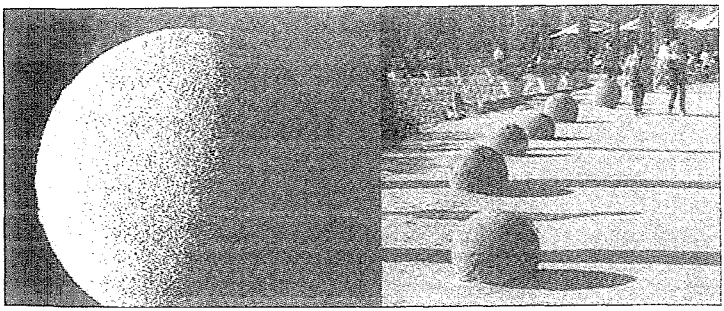


Figura 19.8. Naturaleza *versus* Gaudí: huevo de *Saltasaurus versus* esferas en el Parque Güell (fotografía del autor).

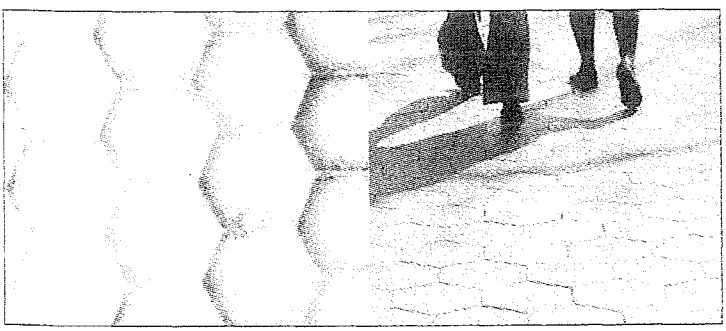


Figura 19.9. Naturaleza *versus* Gaudí: ojo de insecto *versus* pavimentación del Paseo de Gracia en Barcelona (fotografía del autor).

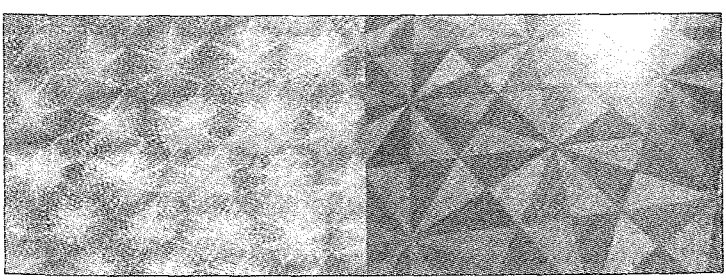


Figura 19.10. Naturaleza *versus* Gaudí: piel de pez cofre *versus* parqué en los apartamentos de La Pedrera (fotografía del autor).

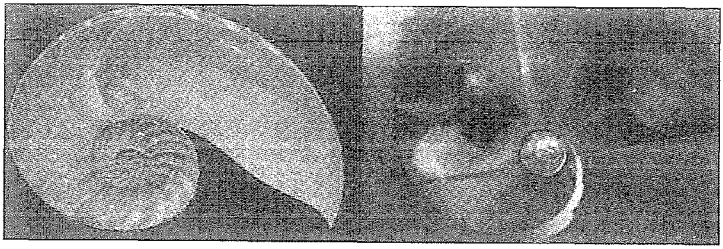


Figura 19.11. Naturaleza *versus* Gaudí: sección de caparazón de *Nautilus versus* vista de la escalera de caracol de una torre de la Sagrada Familia (fotografía del autor).

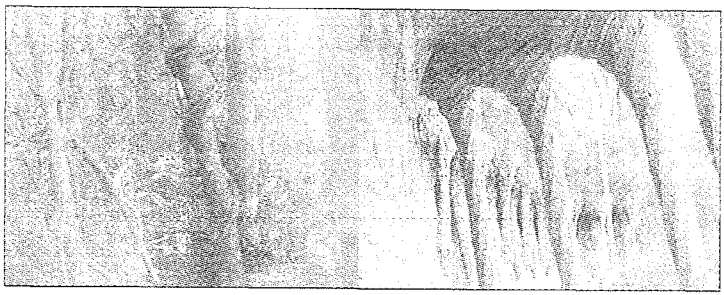


Figura 19.12. Naturaleza *versus* Gaudí: estrangulamiento en un bosque inundado de la Amazonia *versus* columnas en el Parque Güell (fotografía del autor).

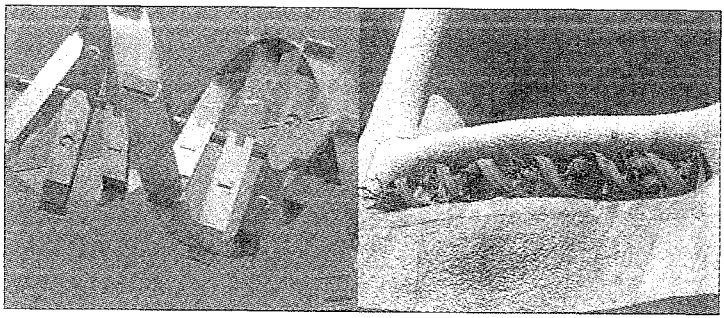


Figura 19.13. Naturaleza *versus* Gaudí: estructura del ADN *versus* forja en el balcón del apartamento principal de La Pedrera (fotografía del autor).

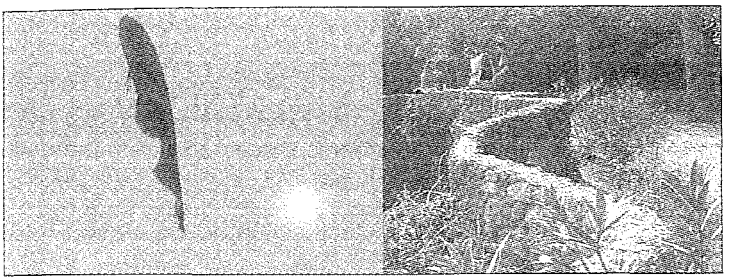


Figura 19.14. Naturaleza *versus* Gaudí: pez nadando *versus* muro del Parque Güell (fotografía del autor).

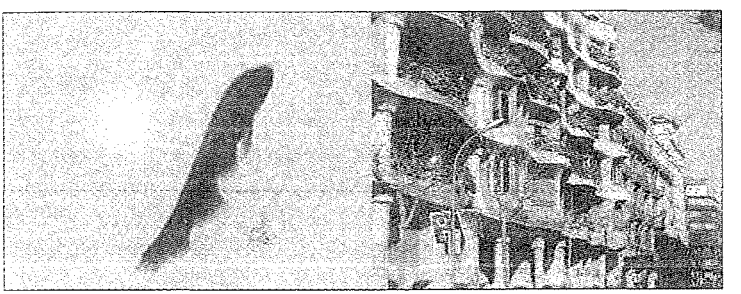


Figura 19.15. Naturaleza *versus* Gaudí: pez nadando *versus* fachada de La Pedrera (fotografía del autor).

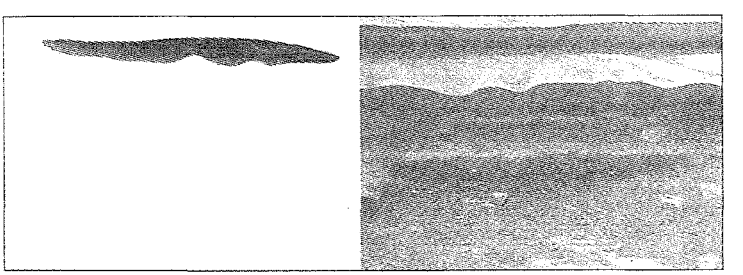


Figura 19.16. Naturaleza *versus* Gaudí: pez nadando *versus* escalón en el Parque Güell en Barcelona (fotografía del autor).

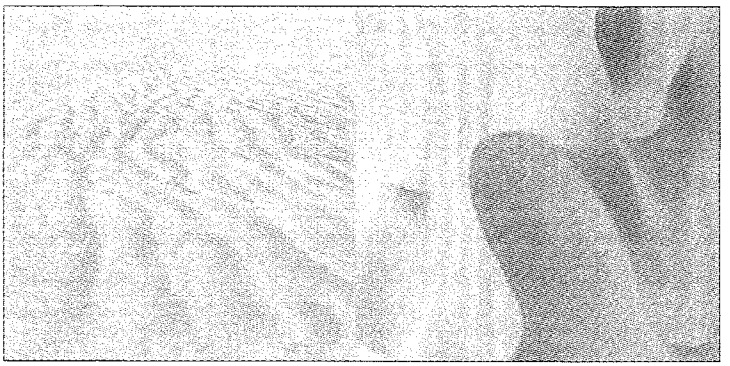


Figura 19.17. Naturaleza *versus* Gaudí: playa del nordeste brasileño *versus* techo de apartamento en La Pedrera (fotografía del autor).

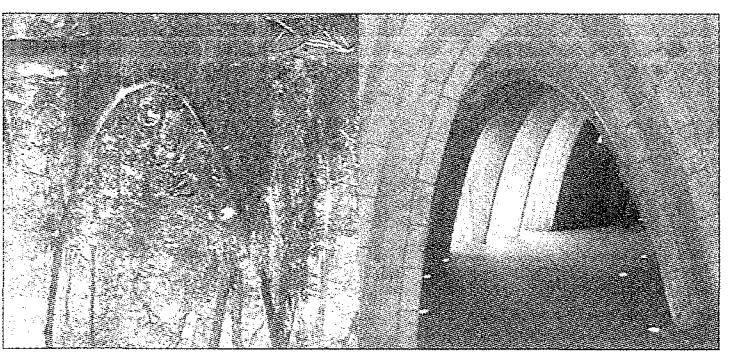


Figura 19.18. Naturaleza *versus* Gaudí: liana catenaria de la selva invertida *versus* arcos del desván de La Pedrera (fotografía del autor).

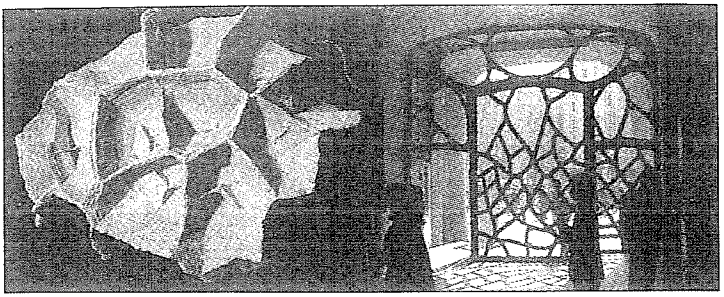


Figura 19.19. Naturaleza *versus* Gaudí: septaria (formación geológica) *versus* contraluz del portal de La Pedrera (fotografía del autor).

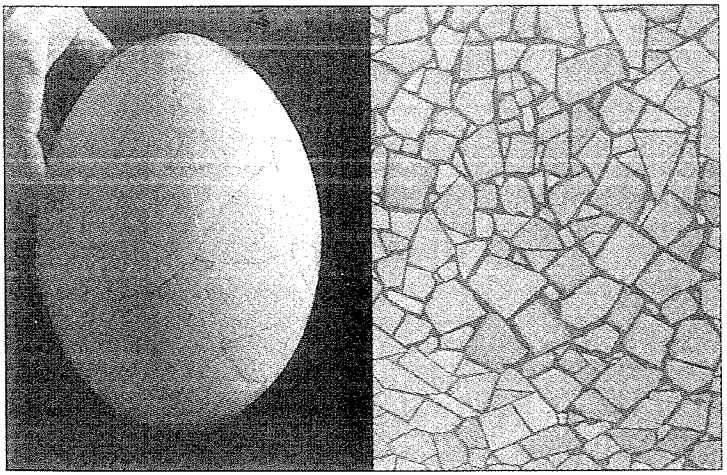


Figura 19.20. Naturaleza *versus* Gaudí: reconstrucción de huevo de pájaro elefante *versus trencadís* de Gaudí (fotografía del autor).

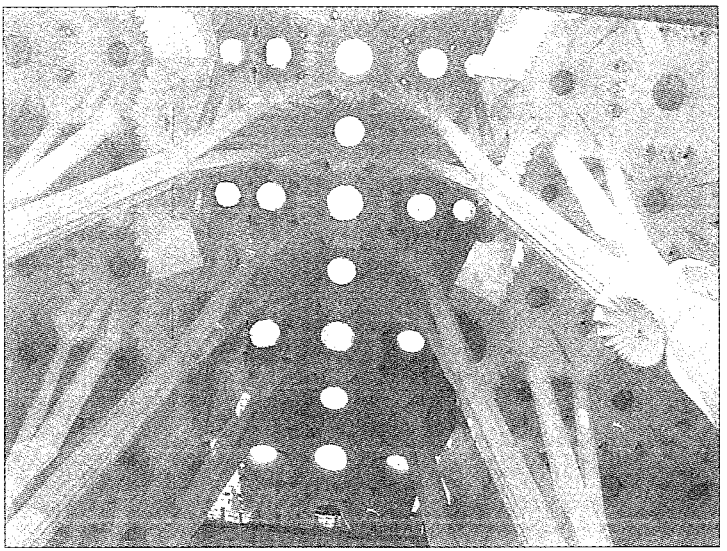


Figura 19.21. Vista de la cubierta de la Sagrada Familia de Gaudí tomada desde el interior. En último término, ¿sólo círculos y fractales? (fotografía del autor).

Gaudí, como buen arquitecto, era un gran observador de la naturaleza. Así acumuló intuiciones de todo tipo, quizá conscientes unas e inconscientes otras. Es un caso único de síntesis de la inteligibilidad y belleza, de sorprendente inteligibilidad y de rara belleza. Dejó poca o ninguna escuela. Su caso da para nuevas reflexiones. He aquí una a modo de muestra.

La forma más frecuente en arquitectura es, con mucho, la línea recta. Gaudí es una de las pocas excepciones. A veces incluso parece evitarla, como si huyera de un vulgar topicazo. Cuando Benoît Mandelbrot, el padre de los fractales, visitó Barcelona por primera vez, quedó cautivado por su obra. «Éste es de los míos, no como Mies Van der Rohe», murmuraba sin cesar. Los arquitectos no se ponen del todo de acuerdo en las razones. ¿Es por belleza? ¿Es por inteligibilidad? ¿Por razones técnicas en la transmisión de órdenes entre diseñador y constructor? ¿Por economía? ¿Por eficacia? El tiempo, en todo caso,

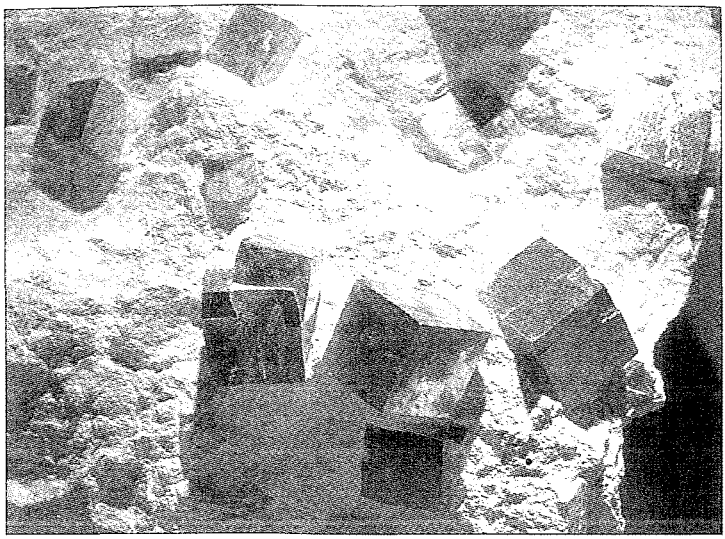


Figura 19.22. Los cristales de pirita de Navajún (La Rioja) son los cubos más perfectos del mundo (colección MCFLC).

fluye en contra de todas esas razones. Llegado el momento de inventar, la selección cultural no debe nada a la selección natural. La grandeza de la cultura está quizás en esa independencia. Pero no deja de ser curioso que la línea recta esté prácticamente ausente de la arquitectura animal y de la naturaleza en general. La gravedad condiciona la verticalidad de los árboles y la horizontalidad local del agua quieta. La cristalización mineral también ofrece paisajes con profusión de segmentos rectos (figura 19.22). Miles de millones de años resistiendo y modificando la incertidumbre por selección fundamental y natural no consagran la línea recta. Sin embargo, es lo que logra rápidamente la selección cultural en su afán por anticiparla. La línea recta quizá sea una genialidad más de la creatividad humana. O quizá no...

Apéndices

Referencias

[1] Thomson, D'Arcy W., *Sobre el crecimiento y la forma*, Blume, Barcelona.

[2] Yourgrau, Wolfgang y Stanley Mandelstam, *Variational Principles in Dynamics and Quantum Theory*, Dover Publications, 1979.

[3] Lemons, Don S., *Perfect Form*, Princeton Paperbacks, 1977.

[4] Wagensberg, J. (ed.), *Proceso al azar*; Tusquets Editores, Barcelona, 1986, Metatemas 12.

[5] Feynman, Richard, *El carácter de la ley física*, Tusquets Editores, Barcelona, 2000, Metatemas 65.

[6] Petrosky, T. e Ilya Prigogine, «Alternative Formulation of Classical and Quantum Dynamics for Non-Integrable systems», *Physica*, 175 A, 156, 1991.

[7] Einstein, Albert, *Mi concepción del mundo*, Tusquets Editores, Barcelona, 1988, Metatemas 16.

[8] Spinoza, Baruj, *Ética demostrada según el orden geométrico*, Trotta, Madrid, 2000.

[9] Barrow, John, *Teorías del Todo*, Crítica, Madrid, 1994.

[10] Weinberg, Steven, *El sueño de una teoría final*, Crítica, Madrid, 1994.

[11] Lederman, Leon, y Teresi Dick, *La partícula divina*, Crítica, Madrid, 1996.

[12] Ilya Prigogine, *Las leyes del caos*, Crítica, Madrid, 1999.

[13] Farina, M., H. Lins de Barros, D. Esquivel y J. Danon, «Ultrastructure of a Magnetotactic Bacterium», *Biol. Cell*, 48, 85-88, 1983.

14] Chaui, Marilena, *A nervura do real, imanência e libertade em Espinosa*, Companhia das Letras, São Paulo, 2000.

[15] Taube, M., *Evolution of Matter and Energy, on a cosmic and planetary scale*, Springer Verlag, 1985.

[16] Masoliver, J. y J. Wagensberg, *Introducció a la teoria de la probabilitat i de la informació*, Edicions Proa, Barcelona, 1966.

[17] Wagensberg, J., «L'Entropia del llenguatge», *Revista de Catalunya*, 3, 22-34, 1986.

[18] Wagensberg, J., J. Valls y J. Bermúdez, «Biological Adaptation and the Mathematical Theory of Information», *Bulletin of Mathematical Biology*, 50, 445-464, 1988.

[19] Lurié, D. y J. Wagensberg, «On Biomass Diversity in Ecology», *Bulletin of Mathematical Biology*, 45, 287-293, 1983.

[20] Lurié, D. y J. Wagensberg, «An Extremal Principle for the Biomass Diversity in Ecology», en *Thermodynamic and Regulation of Biological Principles*, I. Lamprecht y A.I. Zotin (eds.), Berlin Gruyter, 1985.

[21] Lurié, D., J. Valls, y J. Wagensberg, «Thermodynamic Approach to Biomass Distribution in Ecolgical Systems», *Bulletin of Mathematical Biology*, 45, 869-872, 1983.

[22] Wagensberg, J. y J. Valls, «The [Extended] Maximum Entropy Formalism and the Statistical Structure of Ecosystems», *Bulletin of Mathematical Biology*, 49, 531-538, 1987.

[23] Goodwin, B., *Las manchas del leopardo,* Tusquets Editores, Barcelona, 1998, Metatemas 51.

[24] Silva, P.R., J. Wagensberg y C.R.F. Brandão, «Operárias de *Blepharidatta conops* Kempf, *1967 (Hymenoptera, Formicidae, Myrmicinae)* "disputam" seus imaturos», Carvalho, A.O.R. (coord.), *Anais. Encontro de Mirmecologia,* XV, Londres, 22 a 25 octubre de 2001, págs. 225-227.

[25] Dawkins, Richard, *El gen egoísta*, Salvat Editores, Barcelona, 2000.

[26] Kauffman, S., *Investigaciones (complejidad, autoorganización y nuevas leyes para una biología general),* Tusquets Editores, Barcelona, 2003, Metatemas 76.

[27] Bell, Graham, *Selection, the Mechanism of Evolution,* Chapman & Hall, 1997.

[28] Ulanowicz, Robert E., *Ecology, The Ascendent Perspective,* Columbia University Press, 1997.

[29] Wagensberg, J., A. García Leal y R.V. Solé, «Energy Flow-Networks and the Maximum Entropy Formalism», en *Maximum En-*

tropy and Bayesian Methods, W.T. Grandy (ed.), Kluwer Academic Publishers, 1991.

[30] Gould, S.J., *La grandeza de la vida,* Crítica, Barcelona, 2001.

[31] Mayr, E., *Una larga controversia: Darwin y el darwinismo,* Crítica, Madrid, 1992.

[32] Ruse M., *El misterio de los misterios. ¿Es la evolución una construcción social?,* Tusquets Editores, Barcelona, Metatemas 69.

[33] Dennet, C.D., *Darwin dangerous idea,* Penguin Science, 1996.

[34] Kant, E., *Crítica de la razón pura,* Alfaguara, Madrid, 1998.

[35] Quine, Willard Van Orman, *Desde un punto de vista lógico,* Paidós, Barcelona, 2002.

[36] Moulines, Ulises, *Exploraciones Metacientíficas. Estructura, desarrollo y contenido de las ciencias,* Alianza Universidad, Madrid, 1982.

[37] Lewis, C.I., «The Pragmatic Conception of the A Priori», *The Journal of Philosophy,* 20 (7), 169-177, 1923.

[38] Damasio, Antonio, *Looking for Spinoza: Joy, Sorrow & Feeling Brain,* Harcourt, 2003.

[39] Wagensberg, J., *El progreso: ¿un concepto acabado o emergente?,* Tusquets Editores, Barcelona, 1998, Metatemas 52.

[40] Wagensberg, J., «Complexity versus Uncertainty and the question of staying alive», *Biology and Philosophy,* 2000.

[41] Dennett D.C., *Freedom evolves,* Viking Press, 2003.

[42] *Altenberg Workshops on Theoretical Biology,* The Konrad Lorenz Institute Research, Altenberg, octubre de 1999.

[43] Wagensberg, J., *Patterns in Nonequilibrium Organization*, en *Selforganization and Dissipative Structures,* The University of Texas Press 14 (239), 1982.

[44] Margulis, L. y D. Sagan, *Microcosmos.* Tusquets Editores, Barcelona, 1995, Metatemas 39.

[45] Gott, R. *Los viajes en el tiempo y el universo de Einstein*, Tusquets Editores, Barcelona, 2003, Metatemas 79.

[46] Rubia, F.J., *La conexión divina: la experiencia mística y neurológica.* Crítica, Madrid, 2003.

[47] Wier, A., M. Dolan, D. Grimaldi, R. Guerrero, J. Wagensberg y L. Margulis, «Spirochete and protist symbionts of a termite (Masto-

termes electrodominicus) in Miocene amber», *PNAS*, 99 (3), 1410 - 1413, 2002.

[48] *Cosmos. Del romanticismo a la vanguardia, 1801-2001.* (Textos de Jean Clair, Stéphane Deligeorges, Günter Metken, Mayo Graham, Mary Warner Marien, François Brunet, Eleanor Jones Harvey, Rosalind Pepall, Cristopher Phillips, Barbara Larson, Giovanni Lista, Igor A. Kazus, Constance Naubert-Riser y Didier Ottinger.) Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona e Instituto de Ediciones de la Diputación de Barcelona, 1999.

[49] Getling, A.V., *Rayleigh Bénard Convection: Structures and Dynamics*, World Scientific, 1998.

[50] Jagla, E.A. y G. Rojo, «Sequential fragmentation: The origin of columnar quasihexagonal pattern», *Physical Review* E, 65, 2623, 2002.

[51] Binney, J. y S. Tremaine, *Galactic Dynamics,* Princeton University Press, 1987.

[52] Zhabotinsly, A.M., *Self-oscillating Concentrations,* Nauka, Moscú, 1974.

[53] Vogel, S., *Ancas y palancas, mecánica natural y mecánica humana,* Tusquets Editores, Barcelona, 2000, Metatemas 63.

[54] Sabater Pi, J., «An elementary industry of the chimpanzees in the Okorobiko mountains of Rio Muni», *Primates,* 15 (4) págs. 351-364, 1974.

[55] Glansdorff, P. e Ilya Prigogine, *Structure, stabillité et fluctuations,* Masson, 1971.

[56] Goldbeter, A. y R. Lefever, *Biophys,* J. 12, 1302.

[57] Boiteux, A. y B. Hess, «Oscilltions un glycolysis, cellular respiration and communication», en *Faraday Symposium* (1974).

[58] Wagensberg, J., «Antoni Gaudí, la nature et les formes», *La Revue,* Musée des arts et métiers, 35, 4-15, junio de 2002.

[59] Serrallonga i Gash, *Geometria i mecànica en els models de Gaudí,* tesis doctoral, Escola d'Arquitectura, Sant Cugat del Vallès, 2003.

[60] Mandelbrot, B., *Los objetos fractales,* Tusquets Editores, Barcelona, 2000, Metatemas 13.

[61] Mandelbrot, B., *La geometría fractal de la naturaleza,* Tusquets Editores, Barcelona, 1998, Metatemas 49.

[62] Peitgen, H.-O., J. Hartmut y D. Saupe, *Chaos and Fractals, New Frontiers of Science,* Springer-Verlag, 1992.

[63] Peitgen, H.-O., y D. Saupe (eds.), *The Science of Fractal Images,* Springer-Verlag, 1988.

[64] Kaandorp, J.A., *Fractal Modelling, Groth and Form in Biology,* Springer-Verlag, 1994.

[65] Feder, J. y A. Aharony (eds.), *Fractals in Physics,* North-Holland, 1990.

[66] Fleishmann, M., D.J. Tildesley y R.C. Ball (eds.), *Fractals in the Natural Sciences,* Princeton University Press, 1989.

[67] Lauwerier, H., *Les géometries fractales,* Hermes, 1984.

[68] Gouyet, J.F., *Fractals,* Princeton University Press, 1991.

[69] Barnsley, M., *Fractals Everywhere,* Academic Press, 1988.

[70] Kepler, Johannes, *The Six-Cornered Snowflake (De Nive Sexangula),* Oxford University Press, Oxford, 1976.

[71] Stewart, Ian, *El segundo secreto de la vida,* Crítica, Barcelona, 1999.

[72] Wagensberg, J. y R. Pastor, «Entropy of Form and Hierarchic Organization». C.R. Smith et al (eds.), en *Maximum Entropy and Bayesian Methods,* Seattle, 1991, 141-151, Luwer Academic Publishers, 19.

[73] Jaynes, E., «Information theory and statistical mechanics», *Physical Review,* 108, págs. 171-190, 1957.

[74] Pastor Satorras, R. y J. Wagensberg, «Branch distribution in diffusion-limited aggregation: a maximum entropy approach», *Physica* A 224 (463-479), 1996.

[75] Pastor Satorras, R. y J. Wagensberg, «The maximum entropy principle and the nature of fractals», *Physica* A 251 (291-302), 1998.

[76] Schmidt-Nielsen, K., *Scaling: Why is Animal Size so Important?,* Cambridge University Press, Cambridge, 1984.

[77] West, G.B., J.H. Brown y B.J. Enquis, «A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology», *Science,* 276, 122, 1997.

[78] Wagensberg, J., *Ideas sobre la complejidad del mundo,* Tusquets Editores, Barcelona, 1985, Metatemas 9.

[79] Le Tensorer, J.-M., «Les prémices de la créativité artistique chez Homo erectus», *Mille Fiori. Festschrift für Ludwig Berger. Forschungen in Augst,* 25, (327-335), 1998.

[80] Bernadac, M.-L., B. Léal, M.T. Ocaña (comps.), *Picasso, toros y toreros,* Ajuntament de Barcelona & Electa, Barcelona, 1993.

[81] Giralt-Miracle, D. y Casanova (eds.), *Gaudí 2002, Miscel.lània,* Planeta, Barcelona, 2002.